

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:
ECOEficiENCIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ECO-EficiENCIA PARA EVALUAR EL
APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN LAS CALDERAS DE UNA
PLANTA DE ELABORACIÓN DE CERVEZA EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:
CARLOS FRANCISCO DURÁN VÁSQUEZ
JORGE ANTONIO MARTÍNEZ PEÑA
GABRIELA ALEJANDRA RIVAS CASTRO

PARA OBTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO(A) QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

INGRA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:
ECOEFICIENCIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ECO-EFICIENCIA PARA EVALUAR EL
APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN LAS CALDERAS DE UNA
PLANTA DE ELABORACIÓN DE CERVEZA EN EL SALVADOR**

PARA OBTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO(A) QUÍMICO

PRESENTADO POR:
CARLOS FRANCISCO DURÁN VÁSQUEZ
JORGE ANTONIO MARTÍNEZ PEÑA
GABRIELA ALEJANDRA RIVAS CASTRO

DOCENTE ASESOR:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2025

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE
DOCENTE ASESOR

DEDICATORIAS

Francisco: *A Dios y a mi familia, en especial mi madre, mi hermano y mi abuela Mamatoly; que han sido mi apoyo y mi compañía desde siempre. Esto es por y para ustedes.*

Jorge: *Dedico este trabajo a todas las personas que, de una forma u otra, me han permitido y apoyado a llegar hasta aquí.*

A Dios, por haberme dado la vida y la sabiduría para alcanzar este momento tan significativo en mi formación profesional.

A mi familia, por motivarme siempre a luchar y seguir adelante.

A mis amigos y compañeros de carrera, por todo lo compartido y las historias que vivimos.

Gabriela: *A Dios, por darme la vida y un sentido a mi existencia. A mis padres, que con su esfuerzo y amor me han dado la oportunidad de estudiar y a mi familia por su apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestra querida Universidad de El Salvador.

A la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos.

A cada docente y miembro que la integra.

No habríamos alcanzado este logro sin su apoyo.

Agradezco primera e infinitamente a Dios por todo lo que me ha proveído en su inmenso amor, por cada día de vida, por mi hogar, por la salud, por el trabajo y por todo lo que me ha permitido conocer y aprender hasta ahora; por concederme llegar hasta este importante punto de mi vida como lo es la finalización de una carrera universitaria, que, sin fe en Dios, hubiese sido imposible. Gracias por todo Dios.

Agradezco a toda mi familia, especialmente a mi madre Irene, mi abuela Mamatoly, y a mi hermano Rodrigo, que han sido mis pilares, mi motor y mi apoyo incondicional desde siempre; quienes en momentos difíciles han estado junto a mí; y con fe, paciencia y amor me han ayudado a levantarme y superar esos obstáculos. Agradezco también a mi padre Carlos, mi abuela Yani, mi tía Fátima, a mi amigo Mario y demás parientes que también me acompañaron, me motivaron e impulsaron a nunca rendirme y a siempre seguir adelante.

Agradezco a mis amigos y compañeros que hice durante la carrera, en especial a mis queridos colegas del curso de especialización y tesina: Gabriela y Jorge, con quienes luchamos, sufrimos y gozamos durante todo este viaje y que juntos hemos logrado culminar este trabajo y esta valiosa etapa de nuestras vidas.

Finalmente, agradezco a los catedráticos de la facultad de Ingeniería y Arquitectura, en particular a los docentes de la Escuela de Ingeniería Química y Alimentos, por habernos guiado, enseñado y acompañado en todo este arduo proceso de aprendizaje y que sin duda llevamos una huella de cada uno de ellos que nos acompañará por siempre.

Carlos Francisco Durán Vásquez.

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento, comenzando, en primer lugar, a Dios. Sin Su guía, fortaleza y bendiciones, no habría sido posible alcanzar este logro. Gracias a Su presencia constante en mi vida, he logrado llegar hasta este punto.

Agradezco a mis padres Julia y Tony, quienes, con amor incondicional y esfuerzo incansable, han sido fundamentales en mi formación, tanto personal como académica. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudaba, y por ser mi mayor fuente de motivación.

Agradezco a mis abuelos Graciela y Jorge que siempre me mostraron su apoyo y han sido un pilar muy importante en mi vida.

Gracias a mis amigos y compañeros de tesina Gabriela y Francisco, con quienes he compartido mucho este último año, y estoy feliz de haber tenido su compañía, sabiduría y palabras de aliento necesarias que me ayudó a seguir adelante. Gracias por su amistad sincera y por ser parte esencial de este viaje.

A todos mis amigos y amigas que hice durante la carrera: Alessia Molina, Carlos Jiménez, Emerson García, Josué Pimentel, Katya Aguilar, Lucía Rodríguez, Marvin Ochoa y Mónica Díaz, gracias por todo su conocimiento, por todas las risas y todos los momentos compartidos

Gracias a mi amiga Lucy por apoyarme en todo momento y siempre alentarme a nunca rendirme.

Gracias a mi amigo Erwin que me acompañó durante la carrera, siendo un enorme apoyo en todo momento.

Finalmente, agradezco a los docentes de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura: Ing. Delmy Rico, Ing. Eugenia Gamero, Ing. José Erazo e Ing. Rosa Fernández; quienes, no solo compartieron sus conocimientos, sino también su pasión y compromiso. Gracias por motivarme a alcanzar siempre la excelencia.

Jorge Antonio Martínez Peña.

Siempre he considerado a la gratitud como una de las mejores virtudes que un ser humano puede adquirir a lo largo de su vida, nos regala la humildad para comprender que todo lo que una persona puede ser o puede llegar a ser es gracias al esfuerzo, cariño y paciencia de aquellos que han creído en su potencial.

El día de hoy, quiero agradecer principalmente a Dios, por permitirme llegar con vida a este punto de mi carrera universitaria, por ser el sentido de mi existencia y por siempre acompañarme en los momentos más difíciles, con cariño y dulzura, dándome la esperanza.

Agradezco a mis padres, Jenny Castro de Rivas y Arnoldo Rivas, por creer en mí y en mi potencial, por impulsar mis estudios desde el primer día, porque siempre han estado y me han regalado sus consejos y amor. Nunca podré retribuirles todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanos menores, María Fernanda, Arnoldo Josué, Rafael Antonio, Camila Abigail y Elizabeth Guadalupe por darme la motivación, la alegría, su amor y confianza en todo momento. Gracias por haber forjado lo mejor de mi carácter.

A mis abuelos, Ana Milagro, Francisco, Marta Sonia y Alma Iris, gracias por haber participado directa e indirectamente en mi formación académica y en mi crianza como persona, guardo en mi corazón y en mi memoria cada enseñanza que me han regalado.

A mis tíos, Verónica, Javier, Rocío y María José por el apoyo y el cariño que me han tenido siempre, gracias por ser parte de mi vida, por cuidarme y por tenerme en sus oraciones.

También quiero agradecer a los ingenieros e ingenieras de los cuales he tenido el honor de haber aprendido: Ing. Monge, Ing. Delmy del Carmen Rico Peña, Ing. Laura Mestanza, Ing. Mendoza, Ing. Eugenia Gamero e Ing. Tania Torres. Gracias por su dedicación y compromiso en el noble trabajo de la enseñanza.

A mis compañeros de carrera, con los cuales tuve la dicha de haber compartido mi vida universitaria: Douglas Pérez, Mónica Díaz, Fernanda Torres, Javier Castillo, Eduardo Zepeda, Jorge Martínez, Francisco Durán y Alejandro Molina. Gracias por su amistad.

Y a todos los que han contribuido directa e indirectamente con este logro, Ing. Ariel Artiga e Ing. Ernesto Villavicencio.

Gabriela Alejandra Rivas Castro.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO I: ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
2. OBJETIVOS.....	4
3. JUSTIFICACIÓN.....	5
4. HIPÓTESIS PRELIMINARES	6
5. ALCANCES	7
6. LIMITACIONES	8
CAPÍTULO II: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL	9
7. CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN GENERAL SOBRE CALDERAS	9
7.1 Definición de caldera.....	9
7.2 Partes de una caldera	10
7.3 Tipos de calderas	12
7.4 Características de calderas pirotubulares.....	14
7.5 Componentes y principios de funcionamiento	15
7.6 Funcionamiento de las calderas pirotubulares.....	16
7.7 Contexto histórico del uso de calderas pirotubulares en la industria	20
7.7.1 Aplicaciones generales en la industria. Aplicación en la industria cervecera	21
7.8 Reglamentos, normativas o leyes que se apliquen en generadores de vapor	24
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	32
8. CONDICIONES ACTUALES DEL SISTEMA.....	32

8.1 Especificaciones y Características de combustibles utilizados en calderas	33
8.2 Ecuaciones para balances de materia y energía.....	38
8.3 Cálculo de eficiencia de la caldera	41
8.3.1 Pérdidas con los gases de la combustión.....	43
8.3.3 Método para el cálculo del factor de carga.....	47
8.4 Emisión de gases de efecto invernadero en sistemas de generación de vapor	49
8.5 Cálculo de huella de carbono	51
8.6 Opciones de mejora en eficiencia de calderas o generadores de vapor.....	52
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	57
9.1 PASO 1: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	57
9.2 PASO 2: RECOPIACIÓN DE DATOS DE LA EMPRESA.....	57
9.2.1 Paso 2.1 Historial de consumo	58
9.2.2 Paso 2.2 Inspección Visual	58
9.2.3 Paso 2.3 Análisis de los programas de operación y mantenimiento.....	58
9.2.4 Paso 2.4 Registro de levantamiento de datos	58
9.3 PASO 3: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DATOS.....	59
9.3.1 Paso 3.1: Balance de materia y energía	59
9.4 PASO 4: APLICACIÓN DE OPCIONES DE ECOEFICIENCIA DE SISTEMAS DE VAPOR.....	60
9.5 PASO 5: CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO	65
9.6 PASO 6: REGISTRO DE INDICADORES DE ENERGÍA TÉRMICA.....	66
CAPÍTULO V: RESULTADOS	67
10. RECOPIACIÓN DE DATOS DE LA EMPRESA.....	67
10.1 Calibración de las calderas.	71

11. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DATOS.....	80
11.1.1. ANÁLISIS DE LOS CONSUMOS PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA.....	83
11.1.2 CONVERSIÓN DE UNIDADES.....	85
11.1.3 CÁLCULOS DEL BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA DE CALDERAS.	86
11.1.4 CÁLCULOS DEL BALANCE DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE CALDERAS.....	88
11.1.5. CÁLCULO DEL CALOR ÚTIL	90
11.2.1. CÁLCULO DEL CALOR SUMINISTRADO.....	94
11.2.2 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR GASES DE COMBUSTIÓN O DE CHIMENEA	95
11.2.3. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LA RADIACIÓN Y CONVECCIÓN AL AMBIENTE.....	97
11.2.4. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EN CADA CALDERA.....	100
12. APLICACIÓN DE OPCIONES DE ECOEFICIENCIA DE SISTEMAS DE VAPOR	109
13. CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO	116
13.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	121
14. REGISTRO DE INDICADORES DE ENERGÍA TÉRMICA.....	123
15. EVALUACIÓN ECONÓMICA	128
15.1. Ahorro proyectado con las medidas implementadas	132
16. EVALUACIÓN AMBIENTAL	134
CONCLUSIONES.....	138
RECOMENDACIONES	140

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
ANEXOS	144
ANEXO I. Cumplimiento de mantenimiento de caldera 800 BHP desde enero 2021- agosto 2024.....	144
ANEXO II. Cumplimiento de mantenimiento de caldera 650 BHP desde enero 2021- agosto 2024.....	145
ANEXO III. Cumplimiento de mantenimiento de caldera 200 BHP desde enero 2021- agosto 2024.....	147

INDICE DE FIGURAS

Figura 7.1. Partes principales de una caldera	12
Figura 7.2. Caldera acuotubular (Barrera et. al, 2018 como menciona Gil, 2023)	13
Figura 7.3. Visualización interna de una caldera pirotubular.	16
Figura 7.4. Combustión del combustible en el hogar de la caldera.....	17
Figura 7.5. Visualización interna del llenado con agua de la caldera pirotubular	18
Figura 7.6. Intercambiador de calor de un solo paso.....	19
Figura 7.7. Intercambiador de calor de dos pasos	19
Figura 8.1. Cantidad de calderas por tipo de combustible en El Salvador (Consejo Nacional de Energía, 2014).....	34
Figura 8.2. Diagrama de flujo para un generador de vapor.	39
Figura 8.3. Diagrama de flujo del agua.	39
Fuente: diagrama proporcionado por la empresa en estudio.	39
Figura 8.4. Comportamiento de la eficiencia respecto a la carga.....	46
Figura 8.5. Factores de emisión de diversos combustibles fósiles (Instituto Meteorológico Nacional, 2016).	51
Figura 10.1. Orden y limpieza del área	68
Figura 10.2. Identificación de las calderas	68
Figura 10.3. Tratamiento para agua suave.....	69
Figura 10.4. Automatización en el sistema de purgas	69
Figura 10.5. Diagrama de flujo del arranque del sistema de calderas	70
Figura 11.1. Esquema de entradas y salidas en el sistema de calderas.....	84
Figura 11.2. Esquema de transferencia de calor en el sistema de calderas.	88
Figura 11.3. Diagrama del proceso isobárico para el agua.....	90

Figura 11.4. Diagrama de Sankey para la caldera 200 BHP en base a su eficiencia y pérdidas de calor.	102
Figura 11.5. Diagrama de Sankey para la caldera 650 BHP en base a su eficiencia y pérdidas de calor.	103
Figura 11.6. Diagrama de Sankey para la caldera 800 BHP en base a su eficiencia y pérdidas de calor.	103
Figura 14.1. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado de la planta dividido por mes para el año 2024	123
Figura 14.2. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado del departamento de Suministros dividido por mes para el año 2024	124
Figura 14.3. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado del departamento de Elaboración dividido por mes para el año 2024	124
Figura 14.4. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado de Envasado dividido por mes para el año 2024	124

INDICE DE TABLAS

Tabla 8.1. Formato D1 – Registro de calderas. Metodología de Eficiencia Energética en la Industria.....	32
Tabla 8.2. Límites máximos permisibles en calderas pirotubulares, acuotubulares, de sistema mixto y equipos de calentamiento indirecto (RTS 13.11.02:13).	50
Tabla 8.3. Opciones de mejora para calderas	52
Tabla 10.1. Datos del Combustible.....	67
Tabla 10.2. Fecha de calibración de las calderas	71
Tabla 10.3. Porcentaje de cumplimiento del programa de mantenimiento para el año 2024	73
Tabla 11.1. Cálculo del consumo diario de agua y combustible	83
Tabla 11.2. Conversión de unidades en el balance de masa	86
Tabla 11.3. Datos termodinámicos para líquido subenfriado y vapor sobrecalentado (agua) en el SI.....	91
Tabla 11.4. Tabla de datos termodinámicos para vapor saturado.	92
Tabla 11.5. Tabla del gráfico estándar de la ABMA para pérdidas por radiación	98
Tabla 11.6. Porcentaje del retorno de condensado mensual 2024	104
Tabla 11.7. Tabla Resumen para el análisis de gases de chimenea.....	107
Tabla 11.8. Resultados del análisis de gases de chimenea.....	107
Tabla 12.1. Medidas de ahorro de energía propuestas a la empresa.....	109
Tabla 13.1. Datos del combustible Bunker N° 6 para cálculo de Huella de Carbono	116
Tabla 13.2. Emisiones de CO ₂ en toneladas anuales para cada caldera operando con Fuel Oil.	117
Tabla 13.3. Datos del combustible Gas Licuado Propano para cálculo de Huella de Carbono	119

Tabla 13.4. Emisiones de CO ₂ en toneladas anuales para cada caldera operando con GLP.	120
Tabla 15.1. Ahorro, inversión y costos operativos de estrategias.....	129
Tabla 15.2. Cálculo de depreciación anual.....	130
Tabla 15.3. Flujo de efectivo para evaluación económica sin financiamiento.....	131
Tabla 15.4. Resultados de evaluación económica.....	131
Tabla 15.5. Resumen del ahorro proyectado.....	132

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 10.1. Cumplimiento del programa de mantenimiento para la caldera 800.....	76
Gráfico 10.2. Cumplimiento del programa de mantenimiento para la caldera 650.....	77
Gráfico 10.3. Cumplimiento del programa de mantenimiento para la caldera 200.....	78
Gráfico 13.1. Porcentajes de emisiones anuales de cada caldera.	118
Gráfico 13.2. Comparación de las emisiones de CO ₂ para cada caldera con el cambio de combustible.....	121
Gráfico 13.3. Comparación de las emisiones de CO ₂ no emitidas a la atmosfera por el cambio de Fuel Oil a Gas Propano.	122
Gráfico 15.1. Porcentaje de ahorro según la medida implementada en base al total ahorrado.	133

RESUMEN

Este trabajo se centra en la aplicación de las opciones de eco-eficiencia para optimizar y aprovechar el uso de la energía térmica en las calderas de una planta cervecera en El Salvador. El estudio abarca un análisis del sistema de calderas, buscando alternativas que reduzcan el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las medidas evaluadas, destacan la recuperación de calor, la optimización de purgas, el ajuste de la relación aire-combustible y el aislamiento térmico, con un enfoque en reducir los costos operativos y mejorar el rendimiento ambiental. Los resultados más relevantes incluyen la implementación de sistemas de recuperación de condensados y el aprovechamiento del calor residual de las purgas, lo que ha permitido una reducción significativa en el consumo de combustible. Además, la migración futura a gas licuado propano (GLP) promete una mayor reducción de emisiones de CO₂.

INTRODUCCIÓN

La investigación sobre la optimización de los sistemas de calderas en la industria ha cobrado relevancia en los últimos años, debido a la necesidad de reducir tanto el impacto ambiental como los costos operativos asociados al consumo energético. Las calderas, cuya función principal es generar vapor, son muy importantes en sectores industriales como el cervecero, ya que suministran energía térmica para procesos críticos. Sin embargo, su operación puede generar ineficiencias, como pérdidas de calor y altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que conlleva un mayor uso de combustibles fósiles.

Este trabajo se enmarca dentro de los estudios de eco-eficiencia, una búsqueda para optimizar y aprovechar el uso de los recursos energéticos sin comprometer el rendimiento productivo, a la vez que se minimizan los impactos ambientales. La revisión bibliográfica incluye la importancia de medidas como el aislamiento térmico, la optimización de purgas, y la recuperación de calor residual. Además, el enfoque en la evaluación de alternativas para la planta cervecera permite identificar mejoras específicas, como la recuperación de condensados y la migración a combustibles más limpios como el gas propano, las cuales están alineadas con las tendencias actuales de sostenibilidad industrial.

La implementación de medidas de eficiencia energética no solo reduce el consumo de combustible, sino que también mejora la competitividad de las empresas al cumplir con regulaciones ambientales. La integración de las evaluaciones ambientales realizadas, como las medidas aplicadas en la empresa, permite proyectar un futuro con mayor eficiencia operativa y un menor impacto en el cambio climático

CAPÍTULO I: ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los medios de transmisión de calor más usados en la industria es el vapor de agua, esto debido a la facilidad en su producción (generación) transporte y manejo, por ello, también es usado en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, y a pesar de su fácil manejo, su uso llega a presentar ineficiencias, que se traducen en un mayor consumo de combustible y, por ende, en sobre costos en los procesos productivos. Si aunado a esto se tiene presente que cada día el costo de los energéticos (combustibles fósiles) es cada vez mayor, entonces el ahorro de la energía toma una relevancia ante las empresas, como una estrategia para reducir sus costos operativos (USAID, 2011).

Lo anteriormente descrito también implica problemáticas medioambientales complejas como lo son el efecto invernadero y el calentamiento global, fenómenos relacionados a la alta cantidad generada de gases de efecto invernadero (GEI) en la quema de dichos combustibles fósiles.

Dentro de la industria cervecera los sistemas de generación de vapor de agua (calderas) son fundamentales, y también pueden presentar varios problemas de ineficiencia energética de diversa magnitud (Lapido, 2015), por lo que el presente trabajo busca identificar y tratar dichas ineficiencias en las calderas de la empresa con el fin de reducir tantos los costos de la empresa en estudio, como mitigar los impactos negativos al ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Aplicar estrategias específicas de eco-eficiencia que permitan evaluar un mejor aprovechamiento de la energía térmica en el sistema de calderas de la empresa.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una investigación bibliográfica detallada acerca del sistema de calderas en uso.
- Ejecutar un diagnóstico de la condición actual del sistema de calderas con un análisis de chimenea y retorno de condensado.
- Hacer un balance de masa y energía al interior del sistema de calderas.
- Realizar una evaluación económica y ambiental de alternativas para ahorro energético.
- Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero que representa el sistema de calderas.
- Calcular la huella de carbono del sistema de calderas en la producción de cerveza.

2.3 Preguntas de investigación

- ¿Específicamente que tipo y modelo de calderas se utiliza dentro de la empresa?
- ¿Qué variables se deben considerar para obtener el diagnóstico actual del sistema de calderas en estudio?
- ¿Qué opciones de eco eficiencia tienen mayor factibilidad y viabilidad para aplicarse en el sistema de calderas?

3. JUSTIFICACIÓN

Como se mencionó anteriormente, en las industrias de elaboración de cerveza las calderas desempeñan un papel crucial en varios procesos de producción, ya que proporcionan la energía térmica necesaria para llevar a cabo diversas etapas, como la cocción del mosto, la esterilización y la pasteurización. “La cocción permite la evaporación de los compuestos volátiles formados en la maceración o del lúpulo, así como una concentración de los azúcares y demás componentes no volátiles” (Vogel, 1996 como se cita en Ferreyra 2014).

Como menciona Ferreyra (2014) la temperatura precisa y el control del calor garantizan la calidad del producto final en la elaboración de cerveza, de ahí la importancia de tener en óptimas condiciones los sistemas de transferencia de calor.

Según diversos especialistas en la industria cervecera, las calderas también son utilizadas para generar vapor que se emplea en la limpieza de equipos asegurando la inocuidad en la producción. La optimización del uso de las calderas no solo garantiza la eficiencia en la producción de cerveza, sino también reduce el impacto ambiental de la industria. Al implementar estrategias de eco-eficiencia, como la mejora en el aislamiento térmico, la recuperación de calor residual y la implementación de tecnologías de combustión más limpias, es posible reducir significativamente el consumo de energía térmica y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de cerveza.

El ahorro de energía térmica no solo beneficia al medio ambiente, sino también a la empresa cervecera en términos económicos, al reducir los costos operativos, optimizando su eficiencia y mejorando la competitividad en el mercado.

Además, al adoptar prácticas sostenibles, la empresa puede mejorar su reputación y cumplir con las regulaciones ambientales vigentes, lo que contribuye a su responsabilidad social corporativa (USAID, 2011).

4. HIPÓTESIS PRELIMINARES

4.1 Hipótesis de Investigación.

La hipótesis de investigación será de tipo explicativa.

"La implementación de medidas de eco-eficiencia en el sistema de calderas resultará en un aumento significativo en la eficiencia energética del sistema de calderas de la planta cervecera".

Esta hipótesis se fundamenta en que la implementación de estrategias específicas de eco-eficiencia en el sistema de calderas de la planta cervecera llevará a un mejor aprovechamiento de la energía térmica. La eco-eficiencia se refiere a la optimización de los procesos industriales para lograr un uso más eficiente de los recursos energéticos, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es fundamental para abordar el cambio climático y cumplir los compromisos internacionales en materia de reducción de emisiones.

4.2 Hipótesis nula

H₀: *No hay diferencia significativa en el aprovechamiento de energía térmica entre el sistema de calderas antes y después de la implementación de las estrategias de eco-eficiencia.*

4.3 Hipótesis alternativa

H₁: *Existe una diferencia significativa en el aprovechamiento de energía térmica entre el sistema de calderas antes y después de la implementación de las estrategias de eco-eficiencia, con una mejora notable después de la implementación de estas estrategias.*

5. ALCANCES

- Llevar a cabo un análisis de chimenea en el sistema de calderas con la instrumentación necesaria.
- Realizar una evaluación de las condiciones actuales del sistema de calderas con la información proporcionada por la empresa en el levantamiento de datos.
- Programar una visita técnica a la empresa y evaluar en piso operativo su funcionamiento con ayuda de los operadores del área.
- Recolectar la información necesaria para calcular la huella de carbono y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso del combustible Bunker No. 6.
- Evaluar alternativas viables que se puedan implementar para lograr un ahorro energético desde el punto de vista económico y ambiental.

6. LIMITACIONES

- Actualmente, el sistema de calderas no mide exactamente los kg de vapor que se generan en cada caldera, puede contabilizar y llevar el registro de cuánto agua y combustible entra a la caldera en cuestión, pero no puede medir cuánto se genera en ella. El registro que llevan es únicamente cuánto se consume de vapor en cada área donde se utiliza vapor (Elaboración, Envasado y Suministros).
- Acceso restringido al área de calderas para personas externas a la compañía. Se debe gestionar el permiso para la visita y solicitar supervisión de parte del personal del área, además de solicitar una capacitación en el tema de seguridad antes de ingresar al área.
- No se pueden llevar a cabo pruebas experimentales en el sistema de calderas. Ya que la generación de vapor es fundamental en el proceso productivo de la elaboración y el envasado de la cerveza no se pueden alterar, por ejemplo, los parámetros de presión, temperatura o los “*set-points*” ya establecidos. Cualquier recomendación u observación de mejora se planteará de forma teórica.

CAPÍTULO II: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

7. CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN GENERAL SOBRE CALDERAS

7.1 Definición de caldera

Las calderas de forma sencilla se pueden describir como dispositivos cuya función principal es la de generar vapor, utilizando para ello agua en estado líquido y combustible, entregando a su vez a la salida del proceso vapor, este puede salir como vapor sobresaturado o vapor saturado.

Las calderas o generadores de vapor son fundamentales en el funcionamiento de instalaciones industriales y de servicios, núcleo de los sistemas energéticos en los que están presentes. Ellas producen el vapor que entrega la energía que demandan los procesos de calentamiento y la producción de potencia mecánica. Diferentes autores mencionan este concepto, Rubio (2000) lo define como: “un equipo de gran complejidad. Es un intercambiador de calor altamente sofisticado, en el cual se transfiere al agua el calor desprendido por el combustible para formar el vapor” y por su parte Pérez Garay (1989) dice que: “es la instalación donde se libera mediante la combustión la energía de un combustible y se transfiere al agua convirtiéndola en vapor de la calidad y con los parámetros requeridos para su uso, todo ello con la mayor eficiencia y seguridad posibles”.

Aníbal Borroto (2000), define este concepto de calderas como el “conjunto de equipos y agregados auxiliares, integrados en un esquema tecnológico con el objetivo de producir vapor a partir de agua de alimentación, para lo cual utilizan energía proveniente de una fuente”.

La fuente de energía descrita por Borroto se refiere al combustible, como el de nuestro caso de estudio para la industria cervecera, que actualmente utiliza Fueloil. La energía se obtiene de la reacción de combustión altamente exotérmica del combustible, energía que se le transfiere al agua para producir el vapor.

Nuestro particular interés con la industria de alimentos, y en específico con la elaboración de cerveza para esta investigación, nos lleva a mencionar que el vapor en el proceso de manufactura de la cerveza se utiliza principalmente en las siguientes etapas:

- En la maceración del mosto en el mezclador
- En la olla de cocción para la esterilización del mismo
- En la desgasificación del agua utilizada para la dilución posterior a la filtración de la cerveza
- En la autólisis de la levadura (donde se quema la levadura luego de ser cosechada en la fermentación)
- Para calentar agua en los diferentes equipos de intercambio de calor.
- Pasteurizador y Warmer (área de envasado para esterilizar las latas y botellas)
- En las limpiezas de los diferentes equipos también se utiliza vapor

7.2 Partes de una caldera

Cada componente de una caldera cumple una función específica en el proceso de generación de calor y transferencia de energía. Desde la cámara de combustión donde se quema el combustible hasta el sistema de control que regula el funcionamiento del equipo, cada parte contribuye al rendimiento global de la caldera. ¹Las partes principales de una caldera son:

- ✓ **Quemador:** Elemento de una caldera encargado de quemar el combustible y producir la llama.
- ✓ **Hogar o cámara de combustión:** Alberga el quemador y en su interior se realiza la combustión del combustible utilizado y la generación de los gases calientes. Es donde se alcanzan las temperaturas más altas, próximas a los 2000 °C.
- ✓ **Tubos de intercambio de calor:** A través de su superficie se efectúa el flujo de calor desde los gases generados en la combustión hasta el fluido caloportador.

¹ E. L. M., & says: C. P. V. (2024). Partes de una Caldera. Componentes y Elementos Principales: Euroair. <https://www.euroair.es/blog/partes-de-una-caldera/>

Suelen incluir elementos (retardadores) o geometrías especiales con el fin de mejorar el coeficiente de transmisión de calor humos-fluido.

- ✓ **Circuito de humos:** Su característica principal es la de conducir los humos que producen en la combustión hacia la caja de humos.
- ✓ **Caja de humo:** Es la parte de la caldera donde confluyen los humos que después salen hacia el exterior por la chimenea.
- ✓ **Chimenea:** Es la vía de escape de los humos y gases de combustión hacia el exterior después de haber cedido calor al fluido caloportador. Su trazado es vertical casi totalmente y presenta una envoltura aislante y resistente.
- ✓ **Retorno de agua de una caldera:** Es la toma por donde retorna el agua que viene de los radiadores o el acumulador.
- ✓ **Salida de agua de una caldera:** Es la toma por donde el agua es enviada a la instalación una vez ha entrado en la caldera y se ha calentado.
- ✓ **Circuito de agua:** Es la parte de la caldera por donde el agua circula mientras se calienta al absorber el calor que es transmitido por radiación, conducción y convección.
- ✓ **Salida de fluido caliente:** Desde donde el vapor o el fluido caliente se envía hacia los puntos de consumo de la instalación.
- ✓ **Bomba:** Es el equipo encargado de introducir el fluido frío en estado líquido en la caldera para reemplazar el volumen de fluido caliente que ha abandonado la misma. Para un funcionamiento eficiente, se aconseja que el fluido frío entre en la caldera a una temperatura superior a la del ambiente. En las calderas de vapor y agua sobrecalentada, la temperatura ideal del agua de alimentación debe estar comprendida entre 102 y 105 °C y nunca por debajo de 60 °C.
- ✓ **Carcasa:** Contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio. Debe estar recubierta por una envoltura con material aislante térmico, con el fin de disminuir las pérdidas de calor y proteger a los operarios contra quemaduras.

La figura siguiente contiene las partes principales de una caldera.

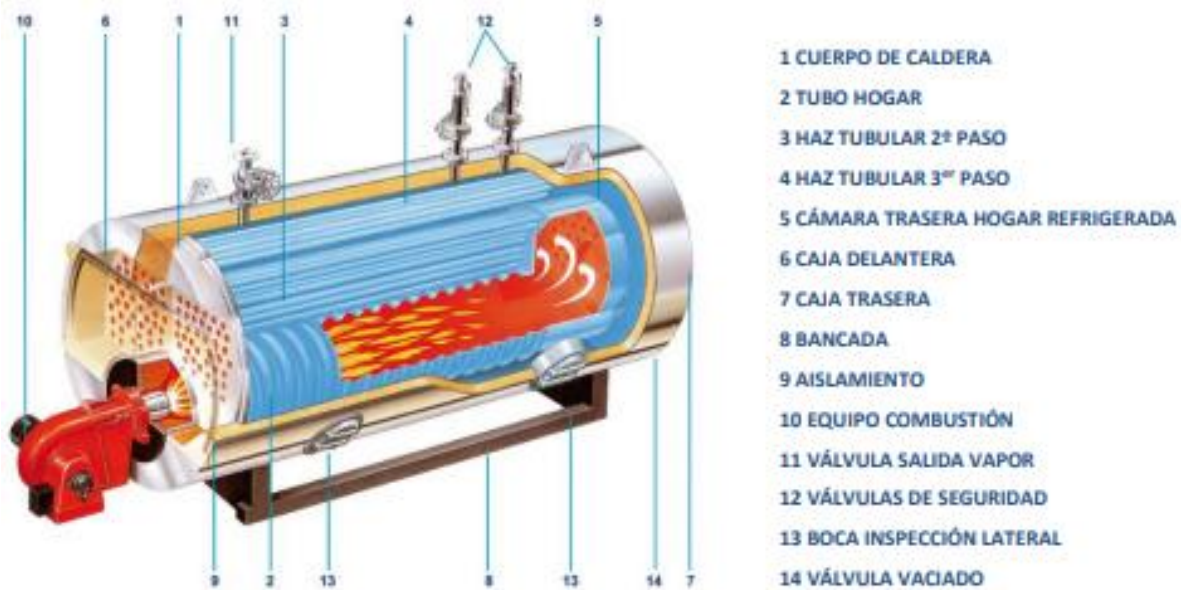


Figura 7.1. Partes principales de una caldera

7.3 Tipos de calderas

Según Gil Acevedo (2023) existen diversos tipos de calderas, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones y condiciones operativas. Desde las calderas más tradicionales hasta las más avanzadas en términos de eficiencia energética y tecnología. Según la posición relativa entre el fluido a calentar y los gases de combustión, las calderas se clasifican en:

- **Acuotubulares:** Son aquellas en las que el fluido a calentar se desplaza por el interior de los tubos y los gases de combustión circulan por el exterior de estos. Se emplean cuando se requieren presiones de trabajo elevadas (mayores a 22 bares), para calentar volúmenes pequeños de agua. Dado que el agua alcanza velocidades considerables, la transmisión de calor es eficiente y la capacidad de producir vapor elevada. Exigen ser alimentadas con agua de gran pureza para evitar incrustaciones en el interior de los tubos y rotura de estos. Su coste es más elevado y, debido al pequeño volumen de agua, se ajustan peor a las grandes variaciones del consumo de vapor. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación. En la figura 7.2 se muestra un ejemplo de caldera acuotubular.

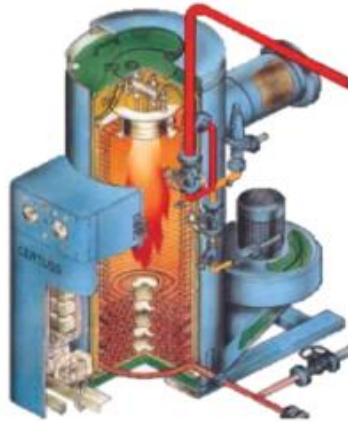


Figura 7.2. Caldera acuotubular (Barrera et. al, 2018 como menciona Gil, 2023)

- **Pirotubulares:** En las que los gases de combustión circulan por el interior de los tubos que se encuentran sumergidos en el agua. Se emplean cuando la presión de trabajo es inferior a 22 bares, para calentar un gran volumen de agua, lo que les permite adaptarse mejor a las fluctuaciones en la demanda de vapor de la instalación. Aunque requieren más tiempo hasta alcanzar la presión de funcionamiento, la exigencia de calidad del agua de alimentación es mucho menor. Según la disposición del haz tubular, las calderas pirotubulares se clasifican en:
 - verticales, si va de la parte inferior a la superior de la caldera.
 - horizontales, si va de la parte delantera a la trasera.

En función del número de haces tubulares, se clasifican en:

- Calderas de un paso de recorrido de los gases.
- Calderas de varios pasos de gases.

7.4 Características de calderas pirotubulares

Dentro de este sistema de calderas ocurren transformaciones químicas y físicas, al ser su principal función la de evaporar el agua este proceso implica la absorción de energía térmica por parte del agua, lo que aumenta la energía cinética de las moléculas, permitiendo que escapen del estado líquido y se dispersen en el espacio circundante en forma de gas o vapor, este calor se obtiene de la quema del combustible, mediante una reacción de combustión.

En nuestro caso de estudio en particular se tiene un sistema de 3 *calderas pirotubulares*, por lo que centraremos la descripción del funcionamiento para este tipo de caldera.

Las calderas pirotubulares son mayoritariamente utilizadas donde se requiere vapor saturado y en operaciones de pequeño y medio porte. El uso más común de este tipo de caldera es en operaciones que requieren capacidad de hasta 166,7 kg/s de vapor y presiones de hasta 1000 kPa, alcanzando los 2000 kPa en equipos especiales, (Bazzo, 1995; Bizzo, 2003). Las ventajas de las calderas pirotubulares están relacionadas con su bajo costo, su construcción simple y su pequeño espacio ocupado, siendo, además, posible usar calderas verticales para ahorrar aún más espacio (Bazzo, 1995; Centrais Elétricas Brasileiras, 2005; Senger, 2015). Las calderas de pirotubulares tienen una eficiencia térmica en el rango de 75%, según (ASME, 2008), y es improbable que obtengan valores más altos, incluso en las mejores condiciones de operación y mantenimiento, (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

La autora Lapido Rodríguez afirma que:

Las calderas pirotubulares aparecen en la industria hace ya más de un siglo, y su evolución ha ido en paralelo al desarrollo técnico. Las primeras eran simples recipientes cilíndricos remachados y hermetizados, a los que se insertaban las tuberías de suministro de agua y extracción de vapor. El calentamiento se efectuaba con la quema de carbón o leña situados debajo. Estas calderas, también conocidas como calderas de tubos de fuego, tienen la particularidad de contar con tubos de humo que pasan a través de una cámara de agua, donde se genera vapor. El agua ingresa en la caldera hasta cierto nivel ya establecido, mientras que en el tubo

central se quema el combustible y se generan los gases de combustión, estos gases de combustión viajan al interior de los tubos de fuego o de humo transfiriendo el calor al agua. Es un intercambio de calor indirecto, pues el agua no entra en contacto con los gases de combustión. El calor se transfiere a través de los tubos de humo que están rodeados por agua.

Los requerimientos industriales de mayores parámetros de presión y temperatura condicionados por el desarrollo técnico traen como consecuencia la necesidad de incrementar el área de transferencia de calor y utilizar materiales de construcción más resistentes. El aumento de las superficies de transferencia se logra introduciendo tubos de pequeños diámetros inmersos en la masa de agua, a través de los cuales circulan los gases calientes provenientes de la combustión, transfieren a su paso el calor, lo que aumenta la eficiencia del equipo. (Lapido, 2015, p 12)

7.5 Componentes y principios de funcionamiento

Según la autora Lapido Rodríguez (2015) la estructura de las calderas pirotubulares está compuesta por:

- Hogar o tubo central: cámara o lugar donde ocurre la quema del combustible con la consiguiente liberación de calor.
- Tubos de humos o fluses: conjunto de tubos de mucho menor tamaño, por los que circulan los gases de la combustión luego de abandonar el hogar.
- Placas: limitan en ambos extremos el volumen de la cámara de la caldera.
- Casco o carcasa: constituye la envoltura exterior o cuerpo de acero.
- Cámara de agua: parte del volumen que ocupa el agua en su interior.
- Cámara de vapor: parte del volumen que ocupa el vapor producido.

Además de estas partes que conforman su estructura, necesita de otros agregados como son: quemador, bombas de combustible, bombas de agua y ventilador.

En la figura siguiente se muestra la estructura y los componentes de una caldera pirotubular, con sus componentes y los fluidos de trabajo que la componen para su

funcionamiento. Esta imagen corresponde a las que fabrica la Empresa Productora de Calderas ALASTOR, bajo licencia de UMISA, de España.

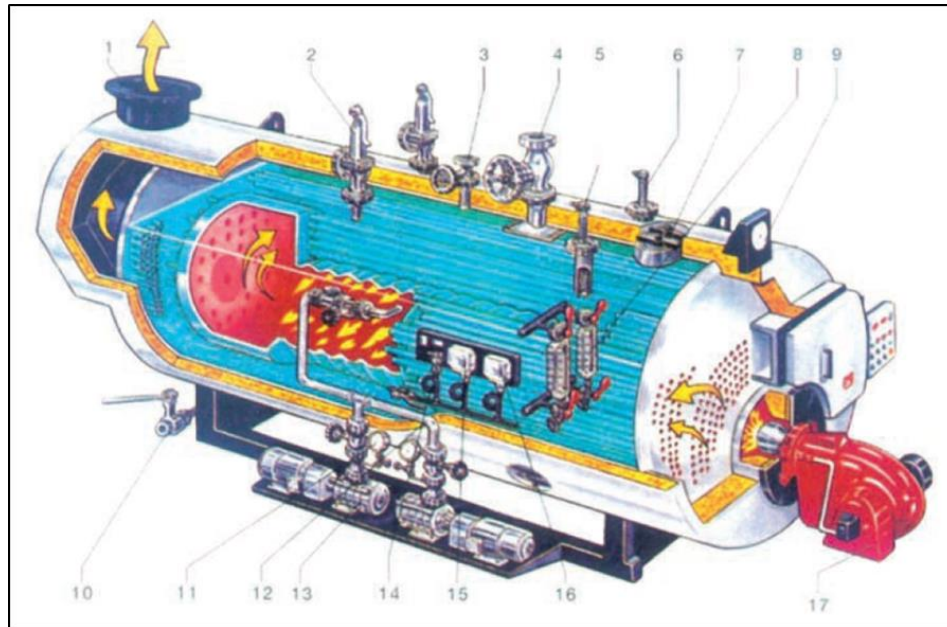


Figura 7.3. Visualización interna de una caldera pirotubular.

1. Evaluación de humos	7. Entrada hombre	13. Bombas de alimentación de agua
2. Válvulas de seguridad	8. Indicadores de nivel	14. Transmisor de presión
3. Salida auxiliar de vapor	9. Manómetro	15. Presóstato de seguridad
4. Salida principal de vapor	10. Purga y vaciado	16. Presóstato de regulación
5. Seguridad de nivel	11. Manómetro	17. Equipo de combustión
6. Regulador de nivel	12. Alimentación de agua	

7.6 Funcionamiento de las calderas pirotubulares

Para la explicación del funcionamiento de las calderas se hace referencia a los conceptos explicados por Lapidó Rodríguez:

En el hogar de la caldera se produce la combustión, dando lugar a la transformación del combustible en gases de combustión con alto contenido energético, es decir, gases con una alta temperatura, estos gases comienzan a circular por las superficies de transferencia, compuestas por tubos de pequeño diámetro llamados fluses.

Desde el hogar y en su paso a través de estos tubos, los gases van cediendo el calor al agua que se encuentra en el exterior, pero contenida dentro de la carcasa, hasta salir con relativa baja temperatura y bajo contenido energético. El calor absorbido por el agua produce vapor en la cantidad y con los parámetros de temperatura y presión que demanda el proceso. (Lapido, 2015, pp. 15-16)

El volumen que ocupa el vapor oscila entre 12 y 14 % del volumen total, criterio que siguen las empresas constructoras para el diseño y fabricación.

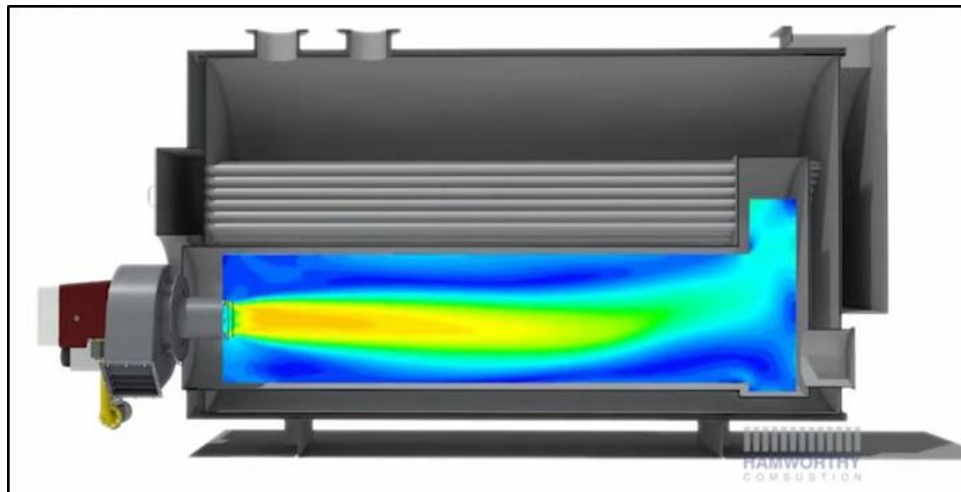


Figura 7.4. Combustión del combustible en el hogar de la caldera.

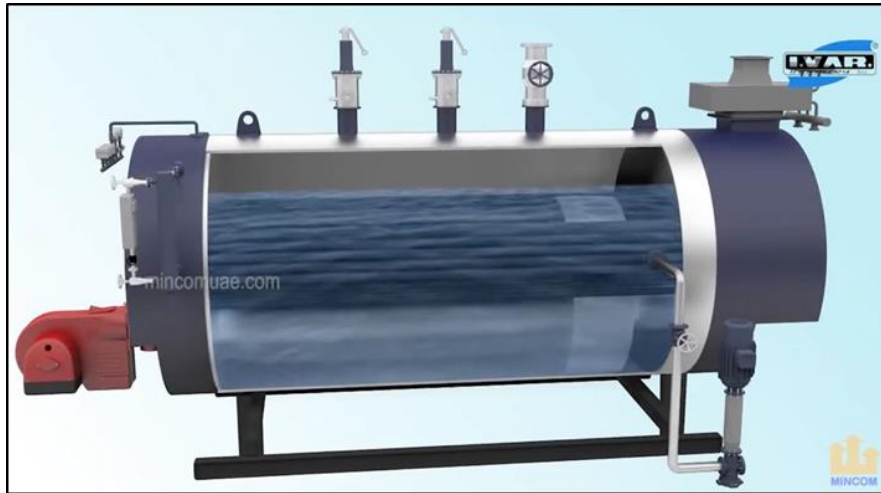


Figura 7.5. Visualización interna del llenado con agua de la caldera pirotubular

Los generadores de vapor pirotubulares se diferencian unos de otros, entre otros aspectos, por el número de pases de los gases en el sentido longitudinal, en este caso se clasifican como de dos pases (el hogar y un pase por los tubos de humos), de tres pases (el hogar y dos pases por los tubos de humos), y de cuatro pases (el hogar y tres pases por los tubos de humos). A medida que aumenta el número de tubos de humos, así como la cantidad de pases, aumenta el intercambio de calor, lo cual disminuye la temperatura de los gases a la salida del generador de vapor, y, por consiguiente, se incrementa el rendimiento. No obstante, tiene la desventaja de que aumenta la caída de presión por el lado de los gases, y se encarece por esta razón la instalación (Mingot, 1988, como se citó en Lapido, 2015, p 12).

Del artículo titulado “*Evaluación del sistema de generación y distribución de vapor de una empresa cárnica*” de la Universidad Tecnológica de Pereira se establece que:

En las calderas de vapor pirotubulares los gases, producto de la combustión, circulan por el interior de los tubos, y en la mayoría de los casos la propia combustión se produce dentro de un tubo de mayor diámetro, de ahí su nombre (tubos de fuego), los cuales se encuentran sumergidos en la masa de agua. (Reyes, 2021 p 5)

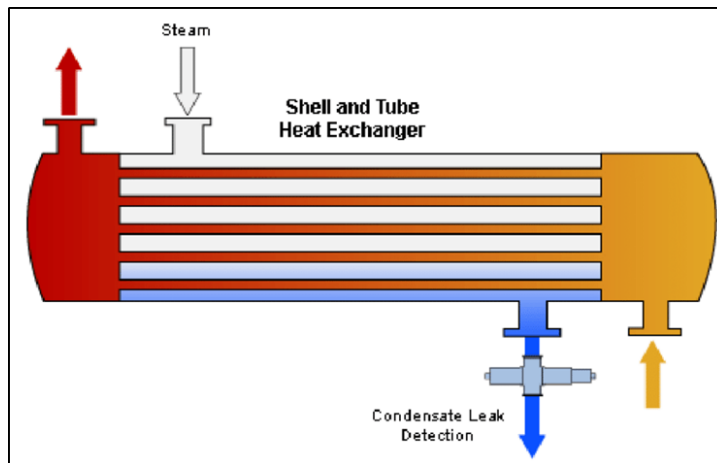


Figura 7.6. Intercambiador de calor de un solo paso

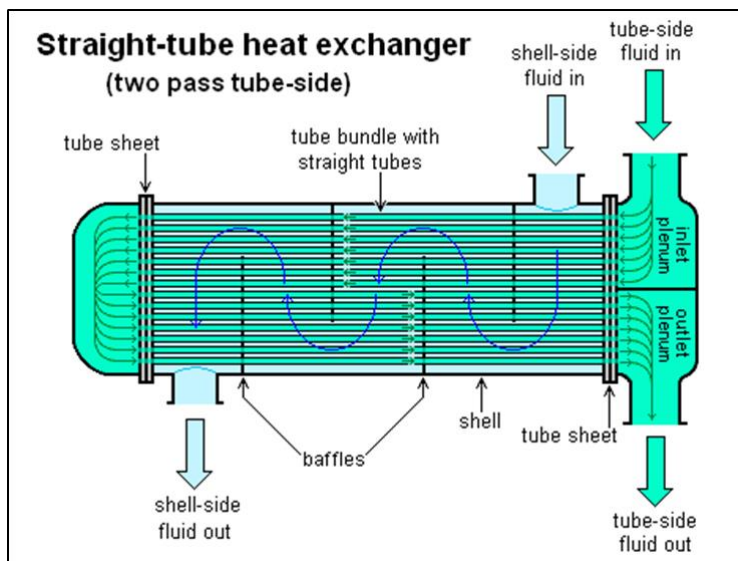


Figura 7.7. Intercambiador de calor de dos pasos

De la figura 7.7, se dice que los deflectores (o en inglés llamados “*baffles*”) tienen la función de lograr coeficientes de transferencia de calor altos porque el líquido se mantiene en estado de turbulencia.

7.7 Contexto histórico del uso de calderas pirotubulares en la industria

Kuppan, T. (2017) menciona que las calderas pirotubulares aparecen en la industria a mediados del siglo XIX cuando la Revolución Industrial estaba en pleno apogeo, y su evolución ha ido en paralelo al desarrollo técnico. Las primeras eran simples recipientes cilíndricos remachados y hermetizados, a los que se insertaban las tuberías de suministro de agua y extracción de vapor. El calentamiento se efectuaba con la quema de carbón o leña situados debajo. Entre los sucesos importantes que han acontecido entorno al uso de calderas pirotubulares en la historia están:

- Revolución Industrial (Siglo XIX): Durante este período, hubo una gran demanda de energía para alimentar las fábricas y maquinaria industrial emergente. Las calderas pirotubulares se convirtieron en una opción popular para la generación de vapor, ya que podían producir grandes cantidades de vapor de manera eficiente.
- Desarrollo de la tecnología de calderas: A lo largo del siglo XIX y principios del siglo XX, se produjeron avances significativos en la tecnología de calderas, lo que permitió la producción de calderas más eficientes y seguras. Estos avances incluyeron mejoras en el diseño de las tuberías, sistemas de control de temperatura y presión, así como el desarrollo de materiales más resistentes.
- Expansión industrial: Con el crecimiento de la industrialización, las calderas pirotubulares se convirtieron en un componente clave en una variedad de industrias, incluyendo la textil, siderúrgica, química, alimentaria y de papel, entre otras. Su capacidad para proporcionar vapor a alta presión los hizo indispensables para el funcionamiento de maquinaria pesada y procesos de producción.
- Normativas y regulaciones: A medida que se reconocieron los riesgos asociados con las calderas, se implementaron normativas y regulaciones para garantizar su seguridad y operación adecuada. Organizaciones como la ASME (American Society of Mechanical Engineers) y la ISO (International Organization for Standardization)

establecieron estándares para el diseño, construcción y mantenimiento de calderas, lo que ayudó a mejorar su seguridad y eficiencia.

- Continuo desarrollo tecnológico: A lo largo del siglo XX y hasta la actualidad, se han seguido realizando avances en la tecnología de calderas pirotubulares. Esto incluye la incorporación de sistemas de control automatizado, mayor eficiencia en la combustión, y el uso de energías renovables como biogás o biomasa como combustible.

Actualmente, con la información del Ministerio de Trabajo Previsión Social (MTPS) y considerando el nombre y ubicación geográfica de los centros de trabajo, se agregó el sector y actividad económica a la que pertenece; a partir del cruce de información se puede resaltar que el sector que utiliza la mayor cantidad de caldera es la Industria (65.4%), posteriormente el sector de servicios (23.1%), Agricultura (7.1%) y el Comercio (4.4%), lo que se puede apreciar en el siguiente gráfico:

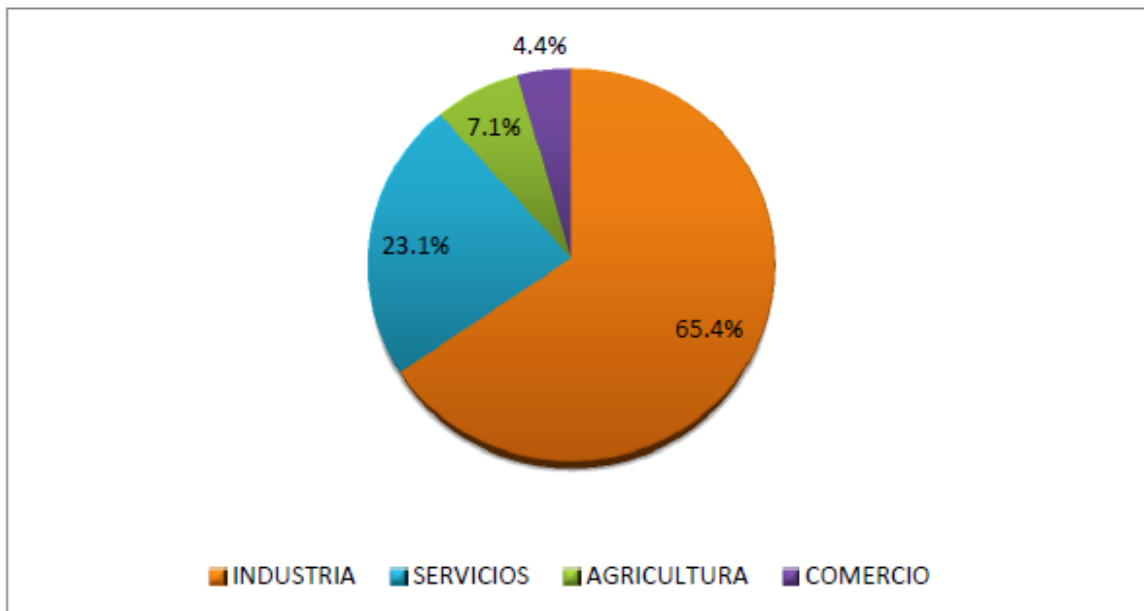


Figura 7.1. Uso de calderas por sector (Consejo Nacional de Energía, 2014)

7.7.1 Aplicaciones generales en la industria. Aplicación en la industria cervecera

Lapido Rodríguez menciona:

Las calderas pirotubulares se destacan en los sistemas de calefacción y producción de vapor requerido en los procesos industriales, donde la demanda de vapor es relativamente reducida, debido a las diversas características propias de estas calderas, como son:

- Su diseño simple y compacto.
- Las facilidades de montaje, instalación y operación.
- El bajo costo inicial.
- Su aceptable eficiencia en su rango de operación.
- El corto período de tiempo para el suministro y puesta en marcha.
- Su gran volumen de almacenamiento de agua.
- Permite compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones de la demanda de vapor.

El incremento de las calderas pirotubulares, en diversos sectores industriales y de servicio ha incentivado a diseñadores e investigadores de calderas a incluirlo un grupo de mejores que se han ido aplicando en los nuevos modelos que se construyen en la actualidad a nivel mundial, dentro de las que se destacan:

- Aumento del área de transferencia de calor, teniendo en cuenta que la inmensa mayoría de las calderas se construyen de tres pases.
- Incorporación de superficies recuperativas en el conducto de salida de los gases de escape para el calentamiento del agua de alimentación o del aire que se introduce para la combustión y que permite aumentar la eficiencia.
- Construcción de calderas con sobre calentadores de vapor.
- Calderas con inversión de llama, con las que se obtiene una mejor combustión al aumentar el tiempo de permanencia en el horno, se logra disminuir el exceso de aire de 10-15 %, y reporta incrementos de eficiencia entre 3-4%.
- La recuperación de calor de los gases puede ser en serie o en derivación, logra incrementos de eficiencia de 6%, otra variante utilizada en estas calderas es el

recuperador de calor de tubos cortos en el que se reportan ahorros de combustibles entre 2 y 8 %.

- Calderas de baja temperatura, su principal diferencia con las convencionales está en la posibilidad de modular la temperatura en función de necesidades caloríficas, alcanzan una eficiencia estacional de hasta 95%. (Lapido, 2015)

Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A., & Stevens, R. (2004) mencionan que la industria cervecera ha experimentado una evolución significativa a lo largo de los siglos. Desde los primitivos métodos de elaboración de cerveza hasta las tecnologías modernas, cada aspecto del proceso de producción ha sido refinado para lograr estándares de calidad y eficiencia cada vez más altos. En este panorama, las calderas pirotubulares emergen como un pilar fundamental, proporcionando la fuerza impulsora necesaria para llevar a cabo los intrincados procesos que transforman los ingredientes simples en una bebida consumida por muchos en el mundo. Entre las principales aplicaciones en esta industria se pueden mencionar:

1. Proceso de maceración: En este proceso, el grano de malta se mezcla con agua caliente para extraer los azúcares fermentables. Las calderas pirotubulares proporcionan el vapor necesario para calentar el agua y mantenerla a la temperatura adecuada durante la maceración.

2. Cocción del mosto: Después de la maceración, el mosto resultante se hierve con lúpulo en el proceso de cocción. Las calderas pirotubulares suministran el vapor para llevar a cabo esta etapa, asegurando que el mosto alcance la temperatura de ebullición necesaria y facilitando la evaporación del agua.

3. Esterilización y limpieza: Las calderas pirotubulares también se utilizan para esterilizar equipos y recipientes, así como para limpiarlos con vapor a alta presión, esto permite mantener la higiene en la planta cervecera y prevenir la contaminación microbiana.

4. Generación de energía: Además de su uso directo en los procesos de producción de cerveza, las calderas pirotubulares pueden alimentar sistemas de generación de energía, como turbinas de vapor, para producir electricidad que alimente la planta cervecera o se venda a la red eléctrica.

5. Secado de malta: En algunas instalaciones, el vapor generado por estas calderas se utiliza para secar el grano de malta antes de su uso en el proceso de elaboración de la cerveza. Este paso es fundamental para eliminar la humedad del grano y garantizar su calidad.

7.8 Reglamentos, normativas o leyes que se apliquen en generadores de vapor

El principal reglamento nacional que se aplica para los sistemas de calderas es el “Reglamento para la Verificación del Funcionamiento y Mantenimiento de Generadores de Vapor” (Decreto 87), el cual complementa el marco legal de la Ley General de Prevención de Riesgos Laborales (Decreto 86). A continuación, se muestra una pequeña recopilación algunos de los artículos de los capítulos I y II de dicho reglamento.

- El capítulo I describe la aplicación y algunas definiciones del reglamento

Según estipula el **Art.1**, el reglamento tiene como objeto velar del uso y condiciones de seguridad aplicables en la instalación, operación, inspección, mantenimiento y reparación de los generadores de vapor.

Según el **Art 2**. Corresponde a la Dirección General de Previsión Social, vigilar e inspeccionar la instalación, la operación y el mantenimiento en condiciones de seguridad de los generadores de vapor; teniendo además las siguientes funciones:

- a) Llevar un control documentado de empleadores que usan generadores de vapor;
- b) Llevar el registro de generadores de vapor; y

c) Verificar las Bitácoras de los empleadores que utilicen generadores de vapor.

Para los efectos de la letra b), se asignará a cada generador de vapor un número oficial, que deberá marcar el Perito en un lugar visible del cuerpo del aparato.

Según el **Art. 4**, los generadores de vapor se clasificarán de la siguiente manera:

a) Con relación a su seguridad:

- 1.- Explosivos.
- 2.- Inexplosivos.

b) Con relación a su uso:

- 1.- Nuevos.
- 2.- Usados.

c) Con relación a su instalación:

- 1.- Permanentes.
- 2.- Provisionales.
- 3.- Portátiles.

d) Con relación a su ubicación:

- 1.- Zona Urbana.
- 2.- Zona Rural.

e) Con relación a su diseño:

- 1.- Acuotubulares.
- 2.- Piro tubulares.
- 3.- Verticales sin tubo.
- 4.- Híbrida.

f) Con relación a su fuente de energía:

- 1.- Combustible gaseoso.
- 2.- Combustible líquido.
- 3.- Combustible sólido.
- 4.- Electricidad.
- 5- Otra fuente de energía.

Para el caso particular de este anteproyecto el sistema de calderas en estudio se clasifica como inexplorivo (con relación a su seguridad), usado (con relación a su uso), permanente (con relación a su instalación), de zona rural (con relación a su ubicación), pirotubular (con relación a su diseño) y de combustible líquido (con relación a su fuente de energía)

- La sección primera del capítulo II del reglamento se describe y se explica las condiciones y requisitos a cumplir del lugar donde se va a instalar o se encuentra instalado el generador de vapor, algunos artículos se mencionan a continuación:

Art. 6.- Para el control documental de los empleadores que utilizan generadores de vapor, la Dirección tomará en cuenta la potencia del generador, el lugar en donde se van a instalar, así como las prescripciones siguientes:

1. Deben ser instalados en un cuarto especial de paredes de ladrillo o concreto y fuera de las áreas de producción.
2. Los pisos y techos de los cuartos para generadores de vapor deben ser construidos con material incombustible.
3. Los generadores de vapor deben quedar a una distancia mínima de tres metros de la vía pública o predio vecino, en caso el generador se instala al mismo nivel exterior.
4. La distancia mínima entre el generador de vapor y las paredes del departamento o cuarto de generadores será de un metro. Además, se debe proporcionar un área frontal y trasera suficiente para su mantenimiento y limpieza, según especificaciones del fabricante.
5. Deberá existir un espacio mínimo libre de dos metros, sobre la parte superior del generador y el techo o estructura del mismo.

6. Cualquiera que sea la potencia de un generador, éste debe ser instalado a una distancia mínima de un metro entre un generador y batería de ellos, incluyendo sus accesorios.
7. Los generadores de vapor con capacidad hasta 100HP (981KW) que se encuentren dentro de las áreas de producción, deben ser aislados por paredes de ladrillo o concreto las cuales deben tener una altura mínima de 25 centímetros (9.84 pulgadas) por arriba de la altura máxima del equipo.
8. Los Generadores de Vapor deberán contar con un pozo de purga o en su defecto, un separador de purga para enfriarlo y poderlas escurrir a las aguas servidas.
9. Todo Generador de Vapor debe contar con un programador automático o en su defecto, controles primarios de llama y éstos podrán ser reemplazados sólo por el equipo adecuado para esta aplicación específica, aprobados internacionalmente.
10. Todo Generador tendrá adherido a su cuerpo principal y en un lugar visible, una placa que indique: el nombre del fabricante, el número de fábrica, el año de fabricación, la superficie y la presión máxima de trabajo para la cual fue construida. Además, se deberá individualizar al equipo con el número de registro asignado por el Servicio en forma visible e indeleble.

El **Art. 10**, respecto a las cámaras de combustión para el caso de los generadores que utilicen combustibles líquidos, gaseosos o sólidos, deben de cumplir los requisitos siguientes:

1. Deben contar con las dimensiones suficientes para que la combustión sea completa, dejando pasar únicamente los gases producidos sin flama alguna.
2. Deben ser construidos de ladrillo u otro material refractario, en un espesor mínimo que corresponda al material empleado, revestido en el exterior de ladrillo rojo de buena calidad o lámina de hierro.
3. Entre el material refractario y el revestimiento exterior, se dejará un espacio no menor de cinco centímetros que se rellenará con carbón vegetal sólido, asbesto, magnesio u otro material aislante, a fin de evitar que el revestimiento exterior se caliente demasiado.

Art. 12.- Todos los conductos de humo o de gases de combustión, incluso los empleados como vías de emergencia o alternativa, deben construirse de tal manera que no permitan la acumulación de gases combustibles, sino que aseguren su arrastre hacia la salida o chimenea.

Las chimeneas deben reunir los requisitos siguientes:

1. Tendrán la capacidad suficiente para dar salida a todos los humos y gases producidos por la combustión, según especificaciones del fabricante.
2. Toda chimenea debe contar con un dispositivo que permita el análisis de gases de combustión y un termómetro visual que mida la temperatura de los gases.
3. La altura de la chimenea de las fábricas y establecimientos industriales no podrá ser en ningún caso inferior a tres metros por encima de la altura mayor de los edificios que la circundan en un perímetro de cincuenta metros considerando la ubicación de los centros de trabajo, con respecto a poblaciones o habitaciones vecinas.
4. Deberán ser construidas de manera que garanticen su completa estabilidad y podrán ser metálicas, de concreto armado, de piedra o de ladrillo con mortero de cemento. Cuando se usen materiales alterables al fuego, deberán revestirse interiormente con materiales a prueba de fuego, hasta la altura que fuere necesario, según la temperatura de los gases de salida. Deberán estar convenientemente sujetadas para lograr su estabilidad.
5. Cuando las dimensiones de la chimenea lo requieran, deberán contar con aberturas practicadas en su base con puertas de cierre, para que pueda fácilmente ser limpiada e inspeccionada.

Art. 13.- Las instalaciones para el empleo de combustibles líquidos en generadores de vapor, reunirán los siguientes requisitos:

1. Los tanques de abastecimiento de los quemadores deben ser contruidos con lámina, completamente cerrados y provistos de un tubo de ventilación que lleve los gases que puedan formarse en aquellos, fuera del local ocupado por los generadores. El

tubo de ventilación tendrá en su extremidad un cuello de ganso provisto con tela metálica de no menos de quince hilos por centímetro lineal.

2. Los tanques deben ser instalados sólidamente, de manera que garanticen por completo su estabilidad.
 3. No existirán fugas en la tubería para el servicio del sistema y éste deberá estar provisto de las válvulas necesarias para comunicar el tanque y el quemador o quemadores, en caso necesario.
 4. Las válvulas de servicio de los tanques, así como las de entrada de vapor o los interruptores eléctricos de los precalentadores para el combustible, deben contar con medios eficientes para ser operadas.
 5. Los tanques para combustibles deben tener los medios necesarios para llenarlos, sin que existan derrames; además, deben contar con un sistema para captar el combustible en caso de derrame.
- La sección segunda del capítulo II trata de los aparatos auxiliares, accesorios y tuberías, entre sus artículos están:

Art. 15.- Todo generador cuya capacidad sea hasta de 100 HP (981 KW), tendrá una válvula de seguridad con capacidad de desalajo al 110%, equivalente a las Libras de Vapor por Hora que genere el equipo a su máxima capacidad.

Cuando su superficie de calefacción o capacidad de evaporación sea mayor de los valores indicados anteriormente, tendrá dos o más válvulas de seguridad.

Art. 18.- La instalación de las válvulas de seguridad en los generadores debe cumplir los requisitos siguientes:

1. Todo generador debe tener conexiones apropiadas para la válvula o válvulas de seguridad requeridas, las cuales deben estar conectadas de manera independiente de cualquiera otra conexión de vapor sin interposición de ninguna otra válvula, debiendo ser el área del orificio igual al área o a la suma de las áreas de la válvula o válvulas que de él dependen.

2. Las válvulas de seguridad deben colocarse lo más cerca posible del generador y, en ningún caso, se permitirá que haya válvulas de cierre entre ambos, ni tampoco en el tubo de descarga de las mismas a la atmósfera.
3. Cuando se utilicen tubos de descarga, éstos deben tener un área no menor que la de la válvula y estarán equipados con dispositivos de desagüe para evitar que el agua se acumule en la parte superior de la válvula.
4. Cuando se coloquen accesorios de venteo en las válvulas de seguridad, sólo se permitirá un niple corto y un codo como máximo, el resto de tuberías de venteo hacia el exterior del orificio deberá ser sobre medido e instalado directamente a la estructura del edificio, quedando éste flotante con respecto a la válvula de seguridad.
5. Si se usa un silenciador en la válvula, el área de salida deberá ser lo suficientemente amplia para evitar que la contrapresión entorpezca la operación o disminuya la capacidad de descarga. Además, estará construido a manera de evitar que se obstruya la salida del vapor, depósitos o desprendimientos de sus partes constitutivas.
6. La descarga de la válvula o válvulas de seguridad deberá hacerse siempre fuera de las plataformas o andamios de trabajo de los generadores.
7. Toda válvula de seguridad llevará grabada o fundida en su cuerpo una marca de fábrica que indique sus características y que permita su identificación.
8. El material empleado en las válvulas de seguridad será de una aleación adecuada, resistente a la corrosión. Las válvulas deberán estar construidas en tal forma, que la falla o ruptura de cualquiera de sus partes no obstruya la libre descarga del vapor.

Art. 34.- En todos los generadores; cuando la presión máxima de trabajo sea mayor de 8.5 kg/cm² o 125 lb/pulg², las tuberías de extracción de fondo deberán tener dos válvulas de purga fabricadas de acero o hierro fundido. En los generadores que tengan tuberías múltiples de descarga, una o más válvulas maestra deberá colocarse en la tubería común de descarga del generador y una en cada descarga individual.

Podrán usarse dos válvulas independientes o combinadas en un solo cuerpo, siempre que la combinación equivalga a dos válvulas independientes o de manera que el desperfecto de una no afecte la operación de la otra.

Art. 39.- Las tuberías principales de vapor deberán estar provistas de medios o dispositivos para compensar su expansión, o contracción, así como estar ancladas fuertemente en los puntos en que sea conveniente, de tal manera que no se transmitan esfuerzos inmoderados a los generadores. Deberán usarse colectores de condensado con sus debidas trampas en la tubería principal, cuando haya pulsaciones fuertes, debidas a las corrientes de vapor, que causen vibraciones en las placas del generador.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

8. CONDICIONES ACTUALES DEL SISTEMA

El sistema cuenta con 3 calderas pirotubulares, cuyas especificaciones técnicas son:

Tabla 8.1. Formato D1 – Registro de calderas. Metodología de Eficiencia Energética en la Industria.

IDENTIFICACIÓN	CALDERA 800 BHP	CALDERA 650 BHP	CALDERA 200 BHP	COMENTARIOS
Tipo de combustible	Bunker no. 6 (Fuel Oil)	Bunker no. 6 (Fuel Oil)	Bunker no. 6 (Fuel Oil)	Es un combustible líquido de alto poder calorífico.
Presión de vapor	85 psig	85 psig	85 psig	Presión normal de operación.
Capacidad (TON vapor/h)	12	10	3	La caldera de base es la de 10 TON/h (650 BHP).
Carga promedio (TON vapor/h)	10	8	1.5	Las calderas no se utilizan a su capacidad máxima.
Horas de operación/año	253	6932	3306	Datos aproximados. Para 12 meses de operación.
Economizador	SI	NO	SI	Equipos economizadores fuera de servicio.
Precalentador de Agua	SI	SI	SI	Se cuenta con sistema de precalentamiento de agua para calderas.
Desareador	SI	SI	SI	Equipo se encuentra deshabilitado y únicamente funciona como acumulador, cabe recalcar que el oxígeno se extrae con tratamiento químico (sulfitos).

IDENTIFICACIÓN	CALDERA 800 BHP	CALDERA 650 BHP	CALDERA 200 BHP	COMENTARIOS
Consumo de Combustible por h (gal/h)	210	185	58	No Aplica
Fecha Última de prueba de eficiencia	26/12/2023	05/04/2024	15/04/2024	No Aplica

8.1 Especificaciones y Características de combustibles utilizados en calderas

Según lo presenta el Consejo Nacional de Energía (2014), en el caso de los combustibles utilizados en las calderas, se pueden destacar que el 79.9% de las calderas utilizan combustibles tradicionales, como son diésel (38.8%), fuel oil y bunker (31.8%).

Así mismo, las calderas consideran otro tipo de combustibles menos utilizados, como lo es Biomasa (9.4%), Gas Licuado de Petróleo (GLP-9.0%), eléctrica (8.1%) y otros (3.0%), en estos últimos se encuentran cogeneración, aceite usado, biodiesel y calderas que usan combustibles mixtos, específicamente vapor-eléctrica, fuel oil- diésel y fuel oil-diésel-GLP.

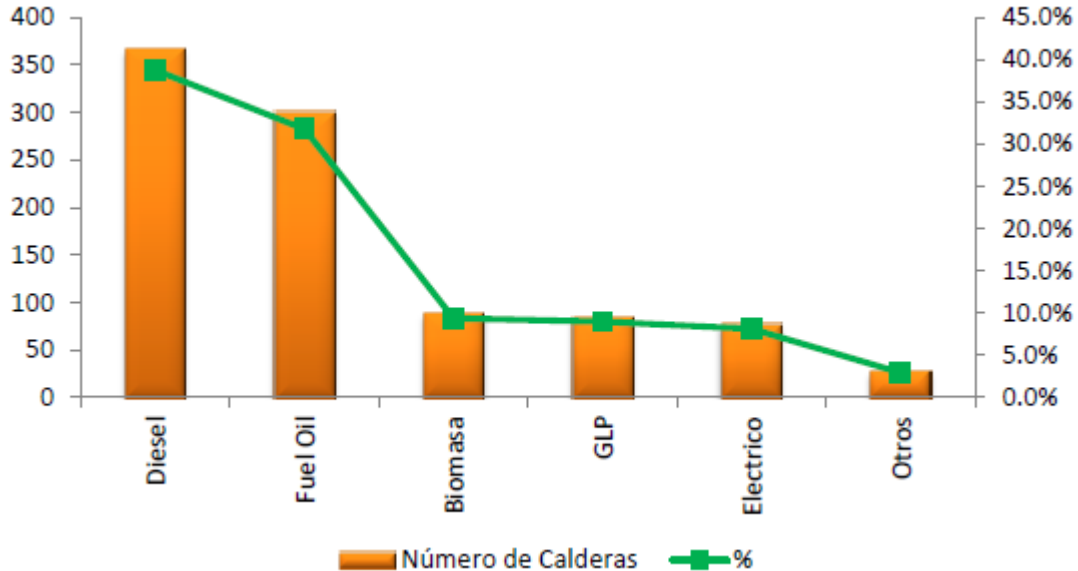


Figura 8.1. Cantidad de calderas por tipo de combustible en El Salvador (Consejo Nacional de Energía, 2014)

Al desagregar las calderas, por sector y actividad económica, se pueden resaltar los siguientes puntos:

- En Agricultura, únicamente se desagrega en la actividad de “agricultura, ganadería, silvicultura y pesca”, y al verificar las empresas en el segmento se encuentran las dedicadas a la producción y exportación de café, criaderos de aves y ganados. En este sector, se destacan calderas que utilizan biomasa para su funcionamiento, especialmente aquellas que se encuentran ubicadas en los beneficios de café e ingenios.
- En el sector de comercio, se destacan empresas dedicadas a la venta de productos al por mayor, específicamente en el sector lácteo, así también se destaca la venta de llantas y tubos para vehículos, venta de productos alimenticios e hilos y telas.
- En el sector industrial, se resalta aquellos productos relacionados con la industria manufacturera, específicamente la elaboración de ropa. Así también se destacan los ingenios, quienes utilizan biomasa para las calderas.

- En el sector servicios, se encuentran empresas dedicadas a actividades artísticas, alojamiento, salud, asistencia social, servicios administrativos, seguridad pública, construcción, suministro de electricidad, gas, transporte y otros.

Tabla de Consumos de Combustibles y Potencia de Calderas en B.H.P y kW
(Consejo Nacional de Energía, 2014):

SECTOR	B.H.P.	kW	Número CALDERAS	DIÉSEL (Gal/hr)	FUEL OIL (Gal/hr)	GLP (Gal/hr)	DIÉSEL (US\$)	FUEL OIL (US\$)	GLP (US\$)
INDUSTRIA	30.00	294.32	42.00	7.19	6.70	10.99	229.46	130.17	197.02
	200.00	1,962.11	34.00	47.92	44.64	73.30	1,529.71	867.82	1,313.48
	60.00	588.63	32.00	14.38	13.39	21.99	458.91	260.35	394.04
	20.00	196.21	30.00	4.79	4.46	7.33	152.97	86.78	131.35
	100.00	981.06	27.00	23.96	22.32	36.65	764.86	433.91	656.74
	50.00	490.53	22.00	11.98	11.16	18.32	382.43	216.96	328.37
	15.00	147.16	20.00	3.59	3.35	5.50	114.73	65.09	98.51
	800.00	7,848.44	19.00	191.69	178.56	293.19	6,118.84	3,471.29	5,253.90
	300.00	2,943.17	17.00	71.88	66.96	109.94	2,294.57	1,301.73	1,970.21
	400.00	3,924.22	14.00	95.85	89.28	146.59	3,059.42	1,735.65	2,626.95
	125.00	1,226.32	13.00	29.95	27.90	45.81	956.07	542.39	820.92
	40.00	392.42	12.00	9.58	8.93	14.66	305.94	173.56	262.70
	600.00	5,886.33	12.00	143.77	133.92	219.89	4,589.13	2,603.47	3,940.43
	80.00	784.84	10.00	19.17	17.86	29.32	611.88	347.13	525.39

Considerando los precios actuales de los combustibles, en especial el del fuel oil (Bunker), puede verificarse en el cuadro anterior, que este producto es utilizado por su bajo costo en el uso de las calderas. En el Sector Industrial la Potencia de las calderas varía desde 0.8 hasta 1744 (8 a 17110 kW), siendo la mayoría de estas las calderas de 30 BHP (294 kW) en su mayoría dedicadas a fabricación de productos lácteos y maquilas de prendas de vestir, le siguen las calderas de 200 BHP (1962 kW) estas están mayormente se utilizan en el sector textil y producción de alimentos.

Especificaciones de calidad del aceite combustible industrial N° 6 (Bunker C): Es el combustible que se utiliza actualmente por la empresa.

<u>CARACTERISTICA</u>	<u>VALORES</u>		<u>UNIDADES</u>	<u>METODO ASTM</u>
Contenido de azufre total (NOTA 1)	3,0	Máx	% masa	D 129-95 (*) ó D 4294-90 (1995) ó D 1552-95
Residuo de Carbón Conradson	22	Máx	% volumen	D 189-95 ó D 4530-93
Agua y Sedimentos	0,5	Máx	% volumen	D 1796-83 (1990)
Punto de Inflamación ("Flash Point")	60	Mín	°C	D 93-96
Gravedad API a 15,56 °C (60°F)	11,0	Mín	°API	D 1298-85 (1990)
Viscosidad Cinemática a 50 °C(**)	92-636		mm ² s	D 445-96 ó D2161-93
Punto de Escurrimiento	24	Máx	°C	D 97-96 ó D5949-96 ó D 5950-96
Contenido Total de Cenizas	0,5	Máx	% masa	D 482-95
Asfaltenos	Reportar		% masa	D 3279-90 ó IP 143
<u>Metales Contaminantes:</u>				
Sodio	Reportar	mg/kg		IP 288 ó UOP 800.79 ó D 5863-95
Vanadio	300	Máx	mg/kg	D 1548-92 ó D 5863-95
Aluminio	Reportar	mg/kg		D 5184-91 (1995)

Fuente: Norma Salvadoreña Obligatoria 75.04.07:97

Tipo No. 6 Bunker C, de muy baja calidad en el mercado nacional. Económico, altamente contaminante, sucio, de manejo problemático y mucho mantenimiento.

El combustible llega a ser más económico siempre y cuando se trabaje al quemador de la caldera las 24 horas seguidas, sin necesidad de apagarlo.

Poder calorífico alto: 10,400 Kcal/Kg.

Especificaciones de calidad del propano comercial: Es el combustible que se planea utilizar en un futuro en lugar del Bunker

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES
Corrosión tira de cobre, 1 h, 37,8 °C (100 °F) (Después de adicionar el Odorizante)	-----	D-1838	No.1 máx.
Contenido de azufre (después de Adicionar Odorizante)	g/m ³ de gas (ppmw)	D-2784	0,35 (185) máx.
Densidad relativa 15,56°C/15,56°C (60°F/60°F)	-----	D-2598	Reportar
Temperatura de evaporación a 95% evaporado	°C	D-1837	-38,3 máx.
Residuo en 100 mL de evaporación	mL	D-2158	0,05 máx.
Mancha de aceite observada	-----	D-2158	Pasar la prueba
Odorizante	g/m ³ liquido	D-5305	12 – 24
Presión de vapor manométrica a 37,8 °C (100°F)	kPa (psig)	D-1267	1434 (208) máx.
Contenido de agua libre	-----	Visual	Nada
Sulfuro de Hidrógeno	mg/kg	D-2420	Pasa la prueba
<u>Composición:</u>			
Butanos (C ₄) y más pesados	% volumen	D-2163	2,5 máx.

Fuente: RTCA75.01.2105

El GLP presenta emisiones limpias a la vista, contaminantes (CO y NOx) requiere de sistemas de seguridad altas, tanto en el manejo, almacenaje y durante su carburación. Se debe evaporar, para poder quemar los vapores de este gas. Mezcla de propano y butano. Bajo poder calorífico por la unidad de venta = 6,350 Kcal/L. Es el combustible más caro del mercado.

8.2 Ecuaciones para balances de materia y energía

Para el balance de materia y de energía se considera:

- Combustible líquido compuesto de carbón, oxígeno, nitrógeno, azufre y agua.
- Aire que contiene oxígeno, nitrógeno y vapor de agua.
- Gases de chimenea compuesto de bióxido de carbón, monóxido de carbón, oxígeno, nitrógeno, bióxido de azufre, vapor de agua.
- Agua fresca fría o saturada según la temperatura la que se encuentre.
- La purga se considera agua líquida saturada a la presión de trabajo de la caldera.
- El vapor de agua que sale de la caldera se considera saturado a la presión que se indique.

8.2.1 Balances de materia

A la entrada de la caldera se tienen 2 fluidos: el agua precalentada y el combustible, que en nuestro caso es el fuel oil (Bunker No. 6), mientras que en la salida de la caldera se obtiene el vapor saturado y los gases de chimenea resultantes de la combustión del combustible. En la empresa seleccionada se cuenta con contadores de vapor que miden la producción en kg de vapor producidos. Un balance general de materia se puede hacer de la siguiente forma (Ecuación 1 y Ecuación 2):

$$\textit{masa del agua entrando} = \textit{masa del vapor saliendo} + \textit{masa de la purga de agua}$$

$$\textit{masa del combustible entrando} = \sum \textit{masa de los gases de chimenea}$$

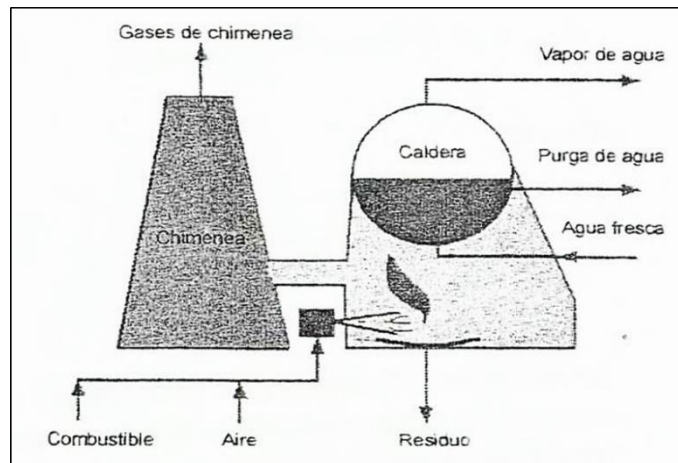


Figura 8.2. Diagrama de flujo para un generador de vapor.

El flujo del agua se logra visualizar en el siguiente diagrama:

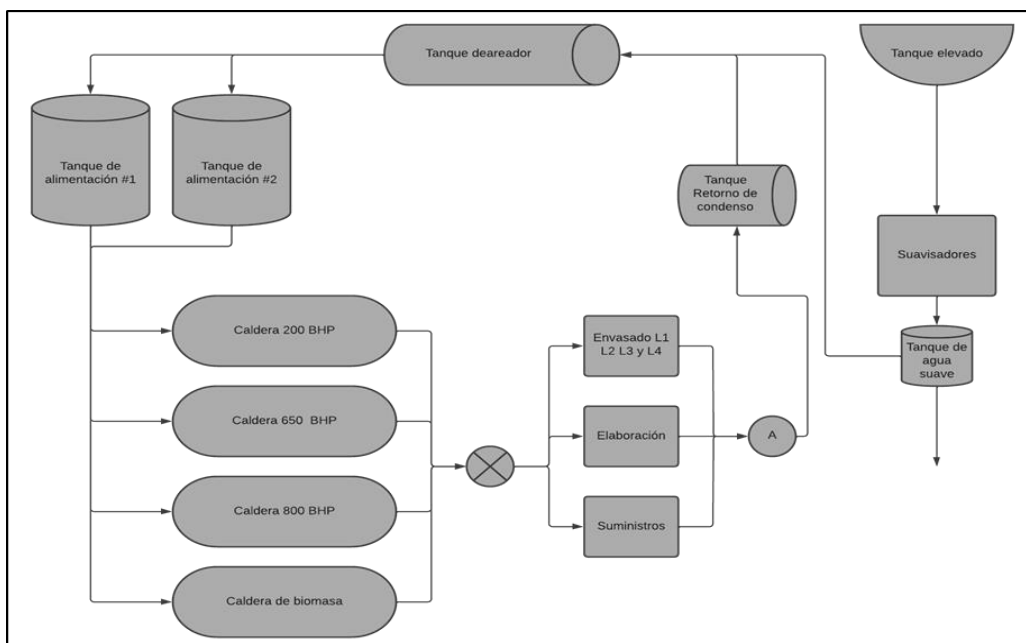


Figura 8.3. Diagrama de flujo del agua.

Fuente: diagrama proporcionado por la empresa en estudio.

8.2.2 Balances de energía

Una caldera es una maquina cuya principal función es la de generar grandes cantidades de vapor de agua. El principio básico del funcionamiento de una caldera es a través de una

cámara donde se produce combustión con aire comburente y en una superficie se traslada calor por conducción.

Partiendo de la primera ley de la termodinámica se establece que, a una presión constante (Sistema de Ecuaciones 3):

$$\begin{aligned}dE &= dQ - dW \\Q_p &= dE + dW \\Q_p &= dE + d(PV) \\&= dE + PdV + VdP \\&= E_2 - E_1 + P(V_2 - V_1) \\&= (E_2 + PV_2) - (E_1 + PV_1) \\&= H_2 - H_1\end{aligned}$$

Esta función solo depende de las condiciones iniciales y finales del sistema, de esta forma la ecuación tiene validez general. Si ahora se considera que además de estar a presión constante no interviene trabajo alguno, salvo el que pueda efectuarse contra la presión atmosférica, entonces la ecuación a utilizar es (Ecuación 4):

$$dH = H_2 - H_1 = Q_p = nC_p dT$$

Esta ecuación es válida sólo si no se realiza ningún otro trabajo, salvo el mecánico ya considerado.

Para un balance energético partimos de (Ecuación 5):

$$Q_{ganado\ del\ agua} = -Q_{perdido\ de\ los\ gases\ de\ combustión}$$

Asumiendo un proceso adiabático (porque las pérdidas por calor en el exterior de la caldera son despreciables), el balance de energía al interior de la caldera se define de la siguiente forma (Ecuación 6):

$$\dot{m}_{agua} (H_{2\text{ agua}} - H_{1\text{ agua}}) = \dot{m}_{g.c} (H_{2\text{ g.c}} - H_{1\text{ g.c}})$$

Siendo g.c los gases generados de la combustión.

Como no se cuentan con tablas termodinámicas para el fuel oil, se puede calcular de los g.c con la capacidad calorífica de los mismos y el cambio de temperatura.

Al considerar un cambio de fase en la corriente de agua, el balance de energía queda finalmente de la siguiente forma (Ecuación 7):

$$\dot{n}_{agua} \int_{T_{1\text{ agua}}}^{T_{eb\text{ agua}}} C_{p_l} dT + \Delta H_{v(aTeb)} + \dot{n}_{agua} \int_{T_{eb\text{ agua}}}^{T_{2\text{ agua}}} C_{p_v} dT = -\dot{n}_{g.c} \int_{T_{1\text{ g.c}}}^{T_{2\text{ g.c}}} C_{p_v} dT$$

Nótese que la corriente que cede el calor, los gases de combustión no cambian de fase.

8.3 Cálculo de eficiencia de la caldera

La eficiencia térmica es el indicador más importante del trabajo de un generador de vapor, ya que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo (Borroto Nordelo, 2000). Se expresa la eficiencia de la caldera en porcentaje o por término de evaporación, que indica la proporción de vapor generado por unidad de combustible quemado en el horno. Existen varios factores de los cuales depende en mayor o menor medida la eficiencia de una caldera, se señalan los más importantes:

1. Combustión completa del combustible, lograda con una mínima cantidad de aire en exceso (Borroto Nordelo, 2000) (Mingot, 1988). Esto permite obtener la mayor cantidad de energía que pueda brindar el combustible utilizado.

2. El enfriamiento profundo de los productos de la combustión (Borroto Nordelo, 2000) (Mingot, 1988). La obtención de temperaturas razonablemente bajas de los gases de la combustión a la salida de la caldera significa buen aprovechamiento del contenido energético de los mismos, indica que se transfirió la mayor cantidad de calor posible a través de las superficies de calentamiento al agua.

3. La reducción de las pérdidas de calor por radiación y convección al medio circundante (Borroto Nordelo, 2000). Las mayores pérdidas que se producen en una caldera pirotubular, y que, por tanto, afectan en mayor medida la eficiencia de las mismas, están determinadas por el calor sensible que se escapa con los gases de la combustión, determinado esto por la alta temperatura que llevan los mismos, y las pérdidas por radiación, presentes en todo momento, ya sea durante el funcionamiento o en los períodos de paradas por bajo consumo de vapor en los equipos instalados en la industria. La eficiencia energética debe tener en cuenta varias aristas que comprendan el aprovechamiento del combustible, que lleva intrínseco el ahorro del portador energético utilizado, la seguridad de la operación del equipo, lo que redundará en beneficio del medio ambiente y la competitividad.

Existen diferentes tipos de eficiencia que dependen del enfoque con el que se realiza el cálculo. Es así como puede darse énfasis al consumo de combustible, a la producción de vapor o la modulación de los recursos. Para esta investigación la eficiencia de las calderas pirotubulares se puede calcular de 3 formas:

1. Eficiencia térmica
2. Eficiencia de recursos
3. Eficiencia de combustión

Para el cálculo de la **eficiencia térmica** se utiliza la siguiente fórmula (Ecuación 8):

$$\eta_{caldera} = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía suministrada}}$$

$$\eta_{caldera} = \frac{Q \text{ absorbido por el fluid}}{Q \text{ suministrado por el combustible}}$$

Dónde:

$$Q \text{ absorbido por el fluido} = \dot{Q}_H = m_1(h_2' - h_1)$$

$$Q_{combustible} = m_{combustible}(P.C)$$

Siendo P.C el poder calorífico del combustible.

En este proceso de intercambio de calor siempre habrá un cambio de entropía $S_2 \neq S_1$ y además $H_2 > H_1$. A presión constante.

En la industria cervecera se trabaja con **vapor saturado**, que no contiene mucha entalpia. A diferencia del vapor utilizado para mover turbinas que generen electricidad que, si necesita contener más entalpia, pues no puede entrar una gota de agua en estado líquido a la turbina, de la misma forma que a una bomba no debería llegar vapor de agua pues esto produce cavitación. La cavitación es la formación y explosión repentina de burbujas de vapor. Este proceso tiene lugar en puntos del interior de la bomba en los que la presión cae por debajo de la presión de vapor del medio bombeado.

8.3.1 Pérdidas con los gases de la combustión

De forma práctica, para los fines de esta investigación se utilizará la ecuación de Siegert para calcular el porcentaje de pérdidas de energía debido a los gases de combustión. Esta ecuación se ampliará y se utilizará en la sección 11.2.2.

A continuación, se explicará de forma teórica otro método para calcular las pérdidas por gases de combustión, en base a las temperaturas de las paredes, del medio circundante y el coeficiente de transferencia de calor con el motivo de enriquecer la información presentada en el trabajo de investigación.

De forma teórica, como menciona Lapido Rodríguez (2015):

Otro efecto negativo desde el punto de vista energético lo constituye el hecho de que, durante los períodos de parada del quemador, por efecto de la convección natural los gases calientes que se encuentran en el hogar fluyen hacia la chimenea y por medio de esta al medio exterior. El espacio dejado libre en el horno y la fluxería es ocupado por aire frío a temperatura ambiente que entra por el conducto del ventilador de tiro forzado, debido a la alta diferencia de temperaturas con las paredes de transferencia provocan un “enfriamiento” de ellas. En el momento del arranque del quemador, el primer paso o proceso que se efectúa es un “barrido” con el ventilador para minimizar la posible presencia de gases combustibles en la cámara que puedan provocar sobre explosiones no controladas. De esta forma

también se contribuye al “enfriamiento” del horno. Se deduce entonces que los primeros volúmenes de combustible que se inyectan al cañón de fuego son empleados en “calentar” las superficies “enfriadas”, según los mecanismos explicados. Los volúmenes de aire “frío” que se incorporan al horno dependen de factores como la capacidad de la caldera, el tipo de quemador, la regulación del ventilador en correspondencia con el ajuste de la combustión.

Las pérdidas q_2 , llamadas pérdidas con los gases de escape, son la mayor fuente de pérdida de cuantas ocurren en la caldera, se mantienen, como las pérdidas por radiación, durante el tiempo en que trabaja. Estas pérdidas se calculan con las siguientes ecuaciones (Ecuaciones 9 y 10):

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_d} = \frac{(I_g - \alpha_{sal} * I_a^0) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)}{Q_d} * 100 (\%)$$

$$\alpha_{rad} = \frac{q_{rad}}{T_p - T_a} \left(\frac{kW}{m^2 \cdot K} \right)$$

Dónde:

q_2 : pérdidas con los gases de escape

Q_2 : calor perdido con los gases de escape

Q_d : Calor disponible $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$

I_g : Intensidad de radiación de los gases de escape $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

I_a^0 : Intensidad de radiación del ambiente

q_4 : calor proveniente del aire atmosférico

α_{sal} : coeficiente de transferencia de calor a la salida en los gases de escape

T_p : temperatura de las paredes

T_a : temperatura del ambiente

En el valor de estas pérdidas están implícitas las temperaturas de los gases producidos durante la combustión y el aire atmosférico, cuya diferencia establece la circulación de los primeros hacia el exterior, arrastran consigo una considerable parte del calor que existe en el horno. (Lapido, 2015, p 23-24)

8.3.2 Factor de carga

Como menciona Lapido Rodríguez (2015, p 27-29):

El generador de vapor que se instale en cualquier industria debe ser seleccionado de forma tal que en todo momento satisfaga los requerimientos de vapor, ya sea cuando el proceso está demandando cargas mínima, máxima o normal, siempre teniendo en cuenta que esto debe suceder con la mayor eficiencia posible en el trabajo del equipo. Como el régimen de trabajo es variable en la mayoría de los procesos, se define un coeficiente o factor de carga, el cual permite conocer en qué medida el generador de vapor está siendo explotado con respecto a su capacidad, o lo que es igual, en cuánto se encuentra subutilizado. La información necesaria para el análisis de este factor de carga se toma a partir de los datos de chapa de la caldera y de los equipos consumidores, los que se suman algebraicamente, en el caso de que dichos consumidores trabajen a tiempo completo y consuman esta cantidad de vapor. Pero en la mayoría de los casos, los procesos no funcionan de esta manera, por ejemplo, en las cocinas, lavanderías y procesos de esterilización, el consumo es intermitente o discontinuo, cada consumidor trabaja solo una parte del tiempo, en el que consume vapor.

Otra forma de conocer o determinar el factor de carga consiste en tomar durante una jornada de trabajo de la caldera, o durante una parte de la jornada laboral, la cantidad de arranques y paradas del quemador, y los tiempos correspondientes a los mismos. Al sumar estos tiempos se conoce qué cantidad del tiempo total estuvo realmente trabajando el generador de vapor, y en qué medida se encuentra sobredimensionada la caldera.

Es decir, el factor de carga se formula de la siguiente manera (Ecuación 11):

$$\phi = \frac{tt_q}{tt_{gv}}$$

Dónde:

tt_q : tiempo de trabajo del quemador (h)

tt_{gv} : tiempo de trabajo del generador de vapor (h)

Del análisis de la fórmula anterior se concluye que para que el generador de vapor cumpla con los requisitos de selección y eficiencia antes mencionados, la igualdad debe ser 1. La obtención de valores inferiores a la unidad indica que el generador se encuentra sobredimensionado y no tiene incorporado un mecanismo o dispositivo regulador que permita ir variando la producción de vapor, según los requerimientos instantáneos del proceso. Un análisis de la curva presentada en el manual de la CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, Cuba 1997) muestra la tendencia a la disminución de la eficiencia de los generadores de vapor según se reduce el porcentaje de carga, o sea, según se reduce el factor de carga por la subutilización. Esto se hace más evidente o marcado cuando se trabaja por debajo del 50 %.

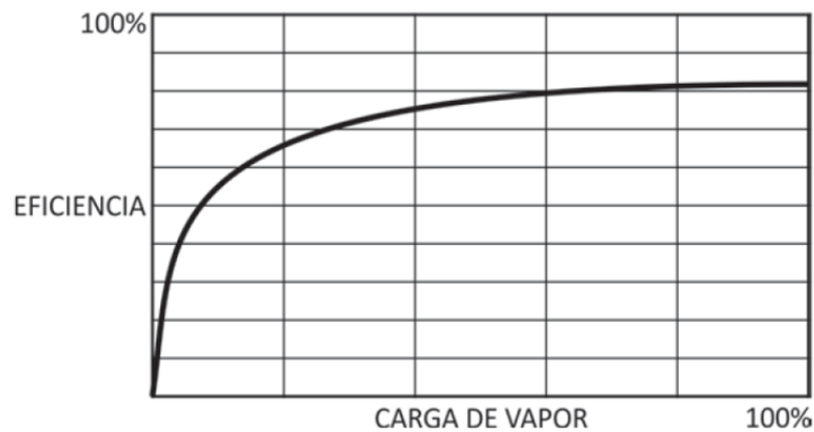


Figura 8.4. Comportamiento de la eficiencia respecto a la carga.

8.3.3 Método para el cálculo del factor de carga

Para el cálculo del factor de carga se detalla según Lapido Rodríguez (2015, p 29-31):

La determinación del factor de carga de las calderas se apoya del Método de Línea de Balance, empleado por ALASTOR, para, prescindiendo de instrumentación sofisticada, hacer el ajuste de la capacidad instalada de las calderas pirotubulares, mediante la realización de un balance de carga-capacidad de producción de vapor, y lograr mantener constante el funcionamiento de estas. Con este método se calcula la relación matemática entre el calor absorbido, el calor disponible y los tiempos de arranques y paradas de la caldera. La tendencia de esta relación hacia la unidad demuestra que el calor absorbido en el sistema energético es igual al disponible luego de la quema del combustible, por tanto, existe correspondencia entre producción de vapor y consumo. De no ser de este modo, el alejamiento del valor obtenido con respecto a la unidad permite establecer en qué medida es superior la capacidad de producción con respecto a la demanda instalada. Este dato permite acometer acciones encaminadas a su corrección.

Para conocer la relación: (del calor absorbido entre el calor disponible) solo es preciso realizar mediciones de tiempos, sin necesidad de recurrir a las ecuaciones tradicionales en función de las variables del proceso, que hacen engorroso, y, por tanto, largo y costoso el cálculo.

Las ecuaciones para utilizar son (sistema de ecuaciones 12):

$$\frac{Q_{abs}}{Q_d} = \left(1 - \frac{t_c}{t_a}\right)$$

Esta ecuación establece la relación entre el calor absorbido y el disponible cuando el quemador funciona, desde su arranque hasta su parada, determinada por los valores de presión ajustados a los que se encuentran los presostatos o controles de presión de la caldera.

Además, existe la ecuación 13:

$$\frac{Q_{abs}}{Q_d} = \frac{t_c}{t_a}$$

En este caso, la ecuación establece la relación entre el calor absorbido y el disponible con el tiempo en que el quemador se encuentra apagado, desde su parada al llegar a la presión máxima de trabajo, hasta su nuevo arranque al llegar a la presión mínima; determinada por los valores de presión ajustados por los presostatos o controles de presión de la caldera. Los términos de estas ecuaciones se definen como:

Q_{abs}: Calor absorbido por los consumidores, las redes y las pérdidas energéticas del sistema

Q_d: Calor disponible al quemarse el combustible

t_c: Tiempo de subida de la presión con la válvula de salida de vapor de la caldera cerrada, o sea, sin carga, desde la presión mínima de trabajo hasta la presión máxima de trabajo, coincidentes con el ajuste de los presostatos; este es el tiempo que transcurre desde que se enciende el quemador hasta que se apaga.

t_a: Tiempo de subida de la presión con la válvula de salida de vapor de la caldera abierta, o sea, con carga, y con todos los consumidores conectados a la red, desde la presión mínima de trabajo hasta la presión máxima de trabajo; este es el tiempo que transcurre desde que el quemador se enciende hasta que se apaga.

t_b: Tiempo de disminución de la presión, desde la presión máxima hasta la presión mínima de trabajo, desde que el quemador se apaga hasta que vuelve a encenderse.

De estas ecuaciones se plantea que:

- En la medida en que el tiempo *t_a* se acerque al valor de *t_c*, indica que disminuye el calor absorbido y, por tanto, es mayor el sobredimensionamiento.
- En la medida en que aumenta *t_b*, indica que es mayor el sobredimensionamiento.

8.4 Emisión de gases de efecto invernadero en sistemas de generación de vapor

La Norma Salvadoreña NSO 13.11.02:11 “Emisiones Atmosféricas Fuentes Fijas Puntuales” tiene como objetivo establecer los límites máximos permisibles de concentración de las emisiones de contaminantes descargados a la atmósfera, generados por las fuentes fijas puntuales, establecidos para proteger la salud y el medio ambiente y cuyo campo de aplicación es válido en todo el territorio nacional, en lo relativo a la prevención y control de la contaminación atmosférica, en cualquier estado de agregación de la materia, generada por las emisiones de fuentes fijas puntuales. (Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica, 2016)

Se utilizarán los parámetros dictados por esta norma para realizar las posteriores comparaciones correspondientes a las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema de caldera en estudio.

PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA CONFORMIDAD

Fórmula para corregir las emisiones de los gases: NO_x, CO, SO₂ y PTS en base seca y a una referencia de O₂:

$$E_r = \frac{20.9\% - O_r}{20.9\% - O_m} \times E_m$$

Donde:

- E_r = Emisión calculada al valor de referencia.
- E_m = Emisión medida de PTS, NO_x, CO y SO₂ en base seca.
- O_r = Nivel de referencia para el O₂.
- O_m = Valor medido para el O₂.

Fórmula para transformar las emisiones de base húmeda a base seca:

$$E_{BS} = \frac{100 E_{BH}}{100 - \% H_2O}$$

Donde:

E_{BS} = Emisión en base seca.
 E_{BH} = Emisión en base húmeda.
 $\% H_2O$ = Contenido de humedad de los gases.

Tabla 8.2. Límites máximos permisibles en calderas pirotubulares, acuotubulares, de sistema mixto y equipos de calentamiento indirecto (RTS 13.11.02:13).

Contaminante	Símbolo	Unidad	GLP	DIESEL	BUNKER C	BIOMASA ²⁾
Dióxido de Azufre	SO ₂	mg/Nm ³	NA	435	2314 ¹⁾	--
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	Reportar	Reportar	Reportar	Reportar
Monóxido de Carbono	CO	mg/Nm ³	Reportar	152	152	Reportar
Óxidos de Nitrógeno	NOx	mg/Nm ³	201	201	408	Reportar
Partículas Totales Suspendidas	PTS	mg/Nm ³	NA	213	213	411
Opacidad		%	NA	30	50	50

Notas:

1) referido a un nivel máximo de 0,03 de fracción de masa (3% masa) de azufre en el combustible
 NA= No aplica

2) Estos límites aplican a equipos que utilicen como combustible biomasa (por ejemplo: cascarilla de arroz, residuos de madera, papel, algodón). Para equipos que utilicen bagazo de caña ver Tabla 6.
 En el caso de calderas pirotubulares, acuotubulares y de sistema mixto que utilicen combustibles fósiles, PTS, SO₂, CO y NOx se reportarán referidos a 10% O₂ base seca.
 En el caso de equipos de combustión indirecta (independientemente del combustible utilizado) y calderas cuyo combustible sea biomasa, PTS, SO₂, CO y NOx se reportarán referidos al 10% O₂ base seca.
 En todos los casos, reportar %O₂ base seca

Los límites máximos permisibles de concentración establecidos en la tabla anterior deben ser cumplidos por todo establecimiento industrial donde para la producción normal se utilicen calderas pirotubulares, acuotubulares y de sistema mixto cuya capacidad nominal sea igual o mayor a 30 CC y/o equipos de calentamiento indirecto cuya capacidad nominal sea igual o mayor a 2 000 MJ/h en base al poder calorífico superior del combustible.


8.5 Cálculo de huella de carbono

La huella de carbono se calcula con la siguiente fórmula directa:

$$\text{Emisiones (kg CO}_2\text{)} = \text{consumo de energía (unidad)} \times \text{factor de emisión (kgCO}_2\text{/unidad)}$$

Donde el consumo de energía es la cantidad de combustible utilizado expresado en las cantidades correspondientes.

A continuación, se presenta una tabla con los factores de emisión de distintos combustibles, para el caso del sistema de calderas en estudio, el combustible utilizado actualmente es el BUNKER, por lo que se utilizarán los datos respectivos.



Sector energía
Dióxido de carbono

Combustible	Factor de emisión (kg CO ₂ /L combustible)	Incertidumbre	
		Límite inferior	Límite superior
Gasolina	2,231	4,59%	5,89%
Diesel	2,613	3,12%	3,19%
Búnker	3,101	3,57%	3,65%
Queroseno	2,541	3,83%	4,10%
LPG	1,611	8,41%	9,16%
Gasolina de avión	2,227	7,94%	23,50%
Jet fuel	2,505	4,68%	5,32%

Figura 8.5. Factores de emisión de diversos combustibles fósiles (Instituto Meteorológico Nacional, 2016).

8.6 Opciones de mejora en eficiencia de calderas o generadores de vapor

En la siguiente tabla se muestran los resultados del “Proyecto de Eficiencia Energética en el Área Térmica”, auspiciado por el Programa de USAID de Excelencia Ambiental y Laboral para CAFTA-DR (el Programa), que brinda un resumen de las medidas de ahorro que se identificaron y evaluaron durante dicho proyecto.

Tabla 8.3. Opciones de mejora para calderas

Medida	Descripción	Ahorro promedio anual de combustible %	PSRI promedio (años)
Instalar aislamiento térmico en líneas, accesorios, tanques y otros elementos calientes que carece de éste	Un buen aislamiento térmico puede reducir las pérdidas de energía entre un 70% a un 90%, así como disminuir los problemas de golpe de ariete, mantener la presión requerida por los equipos de la planta y reducir el riesgo laboral debido a tuberías calientes expuestas al personal.	1.59	1.4
Ajuste de la relación aire combustible, tendiente a valores estequiométricos, en función del tipo de combustible	Es importante reducir el exceso de aire a los niveles mínimos factibles, para aprovechar de mejor manera la energía que contiene el combustible.	3.32	0.5

Medida	Descripción	Ahorro promedio anual de combustible %	PSRI promedio (años)
Eliminar fugas de vapor	El reparar las fugas de vapor trae como beneficio, por una parte, el ahorro de energía, dado que el vapor tiene un alto valor energético, y, por otra parte, se deja de desperdiciar agua tratada, además que se reduce el riesgo laboral.	0.65	0.4
Recuperar condensados para su reingreso a la caldera, minimizando el uso de agua de reposición	Recolectar y aprovechar los condensados del vapor es una de las medidas más importantes en el mejoramiento del circuito de vapor, ya que se recupera la energía del agua y se rescata el agua pura que ya se ha tratado. Con esto se reduce el consumo de combustible en la caldera y se ahorra en el tratamiento químico del agua.	1.82	2.1

Medida	Descripción	Ahorro promedio anual de combustible %	PSRI promedio (años)
Aprovechar el calor de las purgas de la caldera para calentar algún fluido	El recuperar el calor de la purga de la caldera trae como beneficio un aprovechamiento de la energía que contiene esta purga. La medida es una mejora operativa y de adquisición de equipo para el mejoramiento en las instalaciones.	1.88	2.7
Optimizar las purgas en la caldera, en función de las recomendaciones del fabricante de calderas y de referencias imparciales y técnicas	Al reducir la cantidad de agua que se purga de la caldera, puede evitarse pérdidas sustanciales de energía, ya que la temperatura del líquido purgado es la misma que la del vapor generado por la caldera. Si se disminuye la cantidad de purga, también reducirá el costo del agua de repuesto y su tratamiento.	2.11	1.3

Medida	Descripción	Ahorro promedio anual de combustible %	PSRI promedio (años)
Aprovechar el calor de los gases de la chimenea para calentar algún fluido útil, evitando la formación de ácido sulfhídrico	<p>Instalar un sistema que utilice el intercambio de calor y la transferencia de masas entre gas y líquido por contacto directo para recuperar la energía que se pierde por las chimeneas de las calderas.</p> <p>Este sistema tiene ventajas importantes para el control de la contaminación, como la reducción de más del 90% de los gases ácidos y la eliminación superior al 50% de las partículas emitidas.</p>	4.06	2.5
Revisar, dar mantenimiento, reemplazar y/o implementar trampas para condensados	<p>Es importante revisar la operación en las trampas para condensados, ya que con esto se aprovecha mejor la energía del vapor y los condensados al retornarlos a la caldera.</p>	1.27	0.6

Medida	Descripción	Ahorro promedio anual de combustible %	PSRI promedio (años)
Reducir la presión del generador de vapor, hasta presiones adecuadas para el proceso, considerando las pérdidas por la red de distribución de vapor	El reducir la presión en la generación de vapor es una medida operativa, que se aplica en el área de la generación de vapor y en el lado de los usuarios, desarrollando buenas prácticas de operación. Esta recomendación no representa altas inversiones, pero sí un buen control de las operaciones, mediante el monitoreo de las críticas, y la capacitación del personal de planta encargado de realizarlo.	0.65	0
Desincrustación de tuberías internas en calderas	La desincrustación en las tuberías internas de la caldera (fluxes) es una medida correctiva de mantenimiento, la cual se debe practicar cuando se da mantenimiento general a la caldera.	1.67	0.5

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

9.1 PASO 1: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este paso, se llevará a cabo una revisión de la literatura relacionada con el aprovechamiento de energía térmica en sistemas de calderas, así como sobre metodologías de eco-eficiencia aplicables a la industria cervecera. Se recopilarán y revisarán investigaciones, libros, artículos científicos y cualquier otra fuente relevante para fundamentar teóricamente el estudio tales como:

1. Descripción de funcionamiento de las calderas
2. Partes de una caldera
3. Tipos de calderas
4. Contexto histórico del uso de calderas pirotubulares en la industria
5. Aplicaciones generales en la industria. Aplicación en la industria cervecera
6. Condiciones actuales del sistema de calderas
7. Reglamentos, normativas o leyes que se apliquen en calderas
8. Ecuaciones para balances de materia y energía
9. Cálculo de eficiencia de la caldera
10. Emisión de gases de efecto invernadero
11. Cálculo de huella de carbono
12. Opciones de mejora en eficiencia de sistemas de calderas

9.2 PASO 2: RECOPIACIÓN DE DATOS DE LA EMPRESA

Aquí se recopilarán datos específicos de la empresa cervecera objeto de estudio, como información sobre el sistema de calderas, consumo energético, tipo de combustibles utilizados, capacidad de producción, entre otros. Esta información se recogerá tras una inspección visual a toda la planta.

9.2.1 Paso 2.1 Historial de consumo

Energía térmica

Se obtendrán los datos del consumo de combustible de por lo menos los últimos 12 meses. La información a registrar es: El tipo de combustible utilizado, las unidades de registro (L, m³, etc.), el proveedor, capacidad de almacenamiento de la planta, inventario de unidades al inicio de mes, entregas realizadas durante el dicho mes, el costo unitario y total en el mes, así como el poder calorífico del combustible.

9.2.2 Paso 2.2 Inspección Visual

Se hará un recorrido por las instalaciones donde se encuentra el sistema de calderas. Como parte de esta actividad se elaborará un diagrama de flujo del proceso del sistema de calderas.

9.2.3 Paso 2.3 Análisis de los programas de operación y mantenimiento

Se identificarán los problemas de operación y mantenimiento que puedan redundar en una baja eficiencia energética del sistema de calderas. La actividad involucra:

Revisar los programas de mantenimiento existentes.

Averiguar sobre las fechas de su ejecución, su problemática a nivel técnico y organizacional (si es que existe).

Analizar los procedimientos de operación del sistema de calderas

9.2.4 Paso 2.4 Registro de levantamiento de datos

En esta actividad se realizará el levantamiento de los datos de las calderas. Las características serán las siguientes:

- Identificación
- Tipo de combustible
- Presión de vapor

- Capacidad
- Carga promedio
- Horas al año de operación
- Economizador
- Precalentador de agua
- Desareador
- Consumo de combustible por hora
- Fecha de última prueba de eficiencia.

E información extra que ayude en la implementación de medidas de ahorro

9.3 PASO 3: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DATOS

Una vez que la información haya sido recopilada en los pasos anteriores, la información deberá ser capturada y ordenada para proceder a su análisis, y se identificarán las áreas de oportunidad de ahorro de energía que ofrezca el sistema de calderas, así como el consumo de energía de cada una de estas. La actividad a realizar en este paso es la realización del balance de materia y energía.

9.3.1 Paso 3.1: Balance de materia y energía

En el apartado 8.2 del Marco Teórico, se llevó a cabo un análisis de los balances de materia y energía del sistema de calderas con el objetivo de determinar la cantidad de energía térmica utilizada y aprovechada en el proceso de producción de cerveza. Este análisis proporcionó la eficiencia energética del sistema y las áreas de oportunidad para mejorar el aprovechamiento de energía térmica. Por lo tanto, en este paso, nos centraremos en la aplicación de opciones de eco-eficiencia para abordar las ineficiencias identificadas y mejorar aún más el rendimiento del sistema. La información detallada obtenida en el paso anterior servirá como base sólida para la implementación de medidas específicas de eco-eficiencia, con el objetivo de optimizar el uso de la energía térmica en el proceso de

elaboración de cerveza y reducir el impacto ambiental asociado con el funcionamiento de las calderas

9.4 PASO 4: APLICACIÓN DE OPCIONES DE ECOEFICIENCIA DE SISTEMAS DE VAPOR

En este paso, se propondrán diferentes opciones de eco-eficiencia junto con la empresa para evaluar las áreas de oportunidad de energía térmica en el sistema de calderas para posteriormente proponer y aplicarlas:

INSTALACIÓN DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TUBERÍAS CALIENTES

Medidas de Ahorro

- **Aislamiento en tuberías:** Instalación de aislamiento térmico en las tuberías. Esto reduce las pérdidas de energía entre un 70% y un 90%, lo que conduce a ahorros significativos en costos operativos.
- **Deformaciones o arrugas en el aislamiento:** Reparación o reemplazo del aislamiento deformado. Al corregir las deformaciones o arrugas en el aislamiento, se restaura su capacidad para aislar eficazmente y se reducen las pérdidas de energía
- **Aislamiento húmedo:** Reemplazo del aislamiento húmedo. Al sustituir el aislamiento húmedo por material seco y efectivo, se restaura la capacidad de retener el calor y se reducen las pérdidas de energía

INSTALACIÓN DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TANQUES O RECIPIENTES CALIENTES

Medidas de Ahorro

- **Aislamiento en tanques y recipientes calientes:** Instalación de aislamiento térmico en los tanques y recipientes calientes. Esto puede reducir las pérdidas de calor entre un 70% y un 90%, generando importantes ahorros energéticos y económicos, además de reducir el riesgo laboral.

- **Aislamiento húmedo en tanques y recipientes:** Al sustituir el aislamiento húmedo por material seco y efectivo, se restaura la capacidad de retener el calor y se reducen las pérdidas de energía.
- **Cubierta del aislamiento en tanques y recipientes:** Reparación o reemplazo de la cubierta del aislamiento. Al corregir las rupturas en la cubierta del aislamiento, se protege el material subyacente y se mantiene su capacidad para aislar térmicamente.

INSTALACIÓN DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN VÁLVULAS Y BRIDAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR

Medidas de Ahorro:

- **Aislamiento en válvulas y bridas de la red de distribución de vapor:** Instalación de aislamiento térmico en válvulas y bridas. Esta medida puede reducir las pérdidas de energía entre un 70% y un 90%, además de eliminar problemas operativos como golpes de ariete y reducir el riesgo laboral asociado con superficies calientes. Al demostrar que la frecuencia de fallas es mínima y que el aislamiento térmico puede generar importantes ahorros, se puede cambiar la percepción errónea y fomentar la instalación de aislamiento en estos accesorios.
- **Instalación de aislamiento en válvulas y bridas irregulares:** Utilización de aislamiento térmico removible. Aunque puede ser más costoso que el aislamiento fijo, el removible ofrece la ventaja de ser reutilizable y fácilmente desmontable, lo que facilita el mantenimiento de las válvulas y bridas sin comprometer la eficacia del aislamiento.

REDUCIR U OPTIMIZAR EL EXCESO DE AIRE PARA LA COMBUSTIÓN

Medidas de Ahorro

- **Exceso de Aire Elevado:** Ajustar el exceso de aire a niveles mínimos para aprovechar mejor la energía del combustible, lo que puede resultar en ahorros significativos de energía y económicos.

- **Infiltraciones en la Caldera:** Realizar revisiones periódicas para detectar y corregir infiltraciones en la caldera, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia de la combustión y reducir el desperdicio de energía.
- **Bajo Nivel de Aire:** Asegurar un nivel óptimo de aire para una combustión completa, lo que disminuirá la formación de hollín e inquemados, y mejorará la transferencia de calor al agua, resultando en ahorros energéticos y económicos

REPARACIÓN DE FUGAS DE VAPOR

Medidas de Ahorro

- **Fugas de Vapor en el Sistema de Distribución:** Reparación de fugas en las tuberías de distribución de vapor y retorno de condensados para eliminar pérdidas de energía y agua tratada, reduciendo así los costos operativos y los riesgos laborales asociados. Las reparaciones podrían incluir: Cambio de juntas, ajuste de vástagos, cambio de sección de tubería (esto en lugar de únicamente soldar la sección que presenta la fuga) y sustitución de accesorios (válvula, regulador de presión, etc.).
- **Fugas en Equipos de Proceso:** Reparación de fugas en equipos de proceso para ayudar a evitar costos de operación innecesarios y problemas colaterales, como daños en el sistema termoaislante y contaminación de condensados de vapor

RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS DE VAPOR

Medidas de Ahorro

- **Reducir el consumo de combustible:** Recolectar y retornar los condensados al tanque de alimentación de la caldera
- **Utilizar pozos de goteo y trampas para condensados:** Drenado adecuado de los condensados en cabezales distribuidores de vapor y líneas de distribución de vapor para manejar eficientemente el retorno de condensados al sistema

- Control de la temperatura del agua de alimentación a la caldera: Aumentar la temperatura del agua de alimentación puede generar hasta un 1% de ahorro de combustible por cada 6°C de aumento

RECUPERAR EL CALOR DE PURGA DE LA CALDERA

Medidas de Ahorro

- Recuperar el calor contenido en el agua de purga: Instalar un intercambiador de calor para precalentar el agua de alimentación ahorrando entre un 0.3% a un 5.1%
- Recuperación de vapor flash generado por la purga: Recuperar el calor sensible del agua de purga, reducir la presión del tanque de expansión

MINIMIZAR PURGAS DE LAS CALDERAS

Medidas de Ahorro

- Control automático de purga de la caldera: Ajustar la cantidad de purga de forma precisa según la conductividad del agua de la caldera, la cual está directamente relacionada con el nivel de sólidos disueltos.
- Implementación de un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua de la caldera evitando tanto el purgado insuficiente, que podría resultar en la acumulación de sólidos y la formación de depósitos, como el purgado en exceso, que conlleva a desperdicio de agua y energía.

REDUCIR LA PRESIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR

Medidas de Ahorro

Presión del generador de vapor: Implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de la presión del generador de vapor y ajuste proactivo según las demandas de los equipos del proceso para reducir las pérdidas de energía y consumo de combustible, así como la

minimización de riesgos operativos. Pero sin reducir demasiado la presión ya que trae problemas como: Incremento del arrastre de humedad en el vapor, excesivas velocidades en las tuberías existentes, funcionamiento inadecuado de trampas e instrumentos sensibles a la temperatura, menor transferencia de calor en los equipos usuarios del vapor. Los ahorros se encuentran entre un 0.3% y un 1.3% con respecto al consumo de combustible en la generación de vapor. El período simple de recuperación de la inversión es inmediato, ya que las inversiones son bajas o nulas.

DESINCRUSTACIÓN EN TUBERÍAS INTERNAS EN LA CALDERA

Medidas de Ahorro

- **Monitoreo y control del agua de alimentación:** Establecer un programa de tratamiento adecuado para controlar los niveles de calcio, magnesio y sílice dentro de los límites permisibles de la caldera.
- **Temperatura de los gases en la chimenea:** Monitorear el aumento de la temperatura de los gases en chimenea, para evitar la presencia de depósitos o incrustaciones
- **Fluxes de la caldera.:** Inspeccionar visualmente los tubos cuando la caldera se encuentra fuera de operaciones y abierta por mantenimiento o si se encuentra depósitos o incrustaciones, se debe modificar el tratamiento de agua y el programa de suministro de aditivos

9.5 PASO 5: CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO

El cálculo de la huella de carbono se refiere a determinar la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con una actividad, en este caso, la producción de cerveza utilizando el sistema de calderas. Los pasos que se seguirán para calcular el total de emisiones serán:

1. Identificar las fuentes de emisiones: Analiza las etapas del proceso de producción de cerveza que involucran el uso de energía térmica en las calderas.

2. Recopilar datos sobre el consumo de combustible: Se obtendrán datos sobre el consumo de combustible en el sistema de calderas durante un período de tiempo específico. Esto implicará el registro de la cantidad y el tipo de combustible utilizado.

3. Realizar cálculos de emisiones: Se utilizarán los datos recopilados para calcular las emisiones totales asociadas con el uso de energía térmica en el sistema de calderas.

4. Interpretar los resultados: Una vez que se ha calculado la huella de carbono del sistema de calderas en la producción de cerveza, se interpretarán los resultados para comprender el impacto de las actividades en la planta. Se identificarán las principales fuentes de emisiones y se considerarán opciones para reducir la huella de carbono.

En la sección del Marco Teórico, se discutieron los cálculos a realizar de la huella de carbono del sistema de calderas en la producción de cerveza. Por lo tanto, se seguirá con el registro de indicadores de energía térmica para monitorear y evaluar continuamente el desempeño del sistema.

9.6 PASO 6: REGISTRO DE INDICADORES DE ENERGÍA TÉRMICA

Este paso se centra en establecer un sistema efectivo de monitoreo y registro de los indicadores clave relacionados con el consumo y la eficiencia de la energía térmica en el sistema de calderas, estableciendo puntos de referencia y metas de eficiencia energética.

1. *Identificación de los indicadores relevantes:* Se comienza por identificar los indicadores clave para monitorear el consumo y eficiencia de la energía térmica en el sistema de calderas. El indicador que se medirá es el control de energía térmica de cerveza consumido mensualmente, medido en (MJ de vapor consumidos/hL de cerveza envasado).
2. *Selección del método de medición y sistema de registro:* Se solicitarán los datos a la empresa de producción de cerveza los registros del indicador escogido para un monitoreo del rendimiento del sistema de calderas.
3. *Análisis de los datos registrados:* Una vez se haya recopilado los datos, se identificarán posibles áreas de mejora en el consumo y la eficiencia de la energía térmica.
4. *Establecimiento de metas y objetivos:* A partir de los datos registrados se sugerirán establecer metas y objetivos específicos relacionados con la eficiencia energética y la reducción del consumo de energía térmica en el sistema de calderas.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

10. RECOPIACIÓN DE DATOS DE LA EMPRESA

Historial de Consumo

Se obtuvieron los datos del consumo de combustible. La información para registrar ha sido:

Tabla 10.1. Datos del Combustible

DATOS DE COMBUSTIBLE	
Parámetro	Dato
Proveedor	UNO
Capacidad de almacenamiento de la planta	11,000 galones (en total)
Inventario de unidades al inicio del mes	4,000 (variable)
Entregas realizadas mensualmente	Depende de la producción
Costo unitario (junio)	\$2.0358 el granel
Costo total del mes (junio)	\$8,143.20 (4,000 unidades)
Poder Calorífico	38.31 (superior)
	37.16 (inferior)

Inspección Visual:

El sistema de calderas de la empresa cuenta con 3 calderas de 800 BHP (más antigua), 650 BHP (más eficiente, caldera de base) y 200 BHP (de apoyo, menor capacidad). En la inspección visual se logró observar muchas de las mejoras planteadas ya implementadas, además un orden y limpieza en toda el área. De la visitar se pueden adjuntar algunas fotos (que no comprometan la confidencialidad del estudio):



Figura 10.1. Orden y limpieza del área



Figura 10.2. Identificación de las calderas



Figura 10.3. Tratamiento para agua suave



Figura 10.4. Automatización en el sistema de purgas

Flujograma para el arranque de calderas

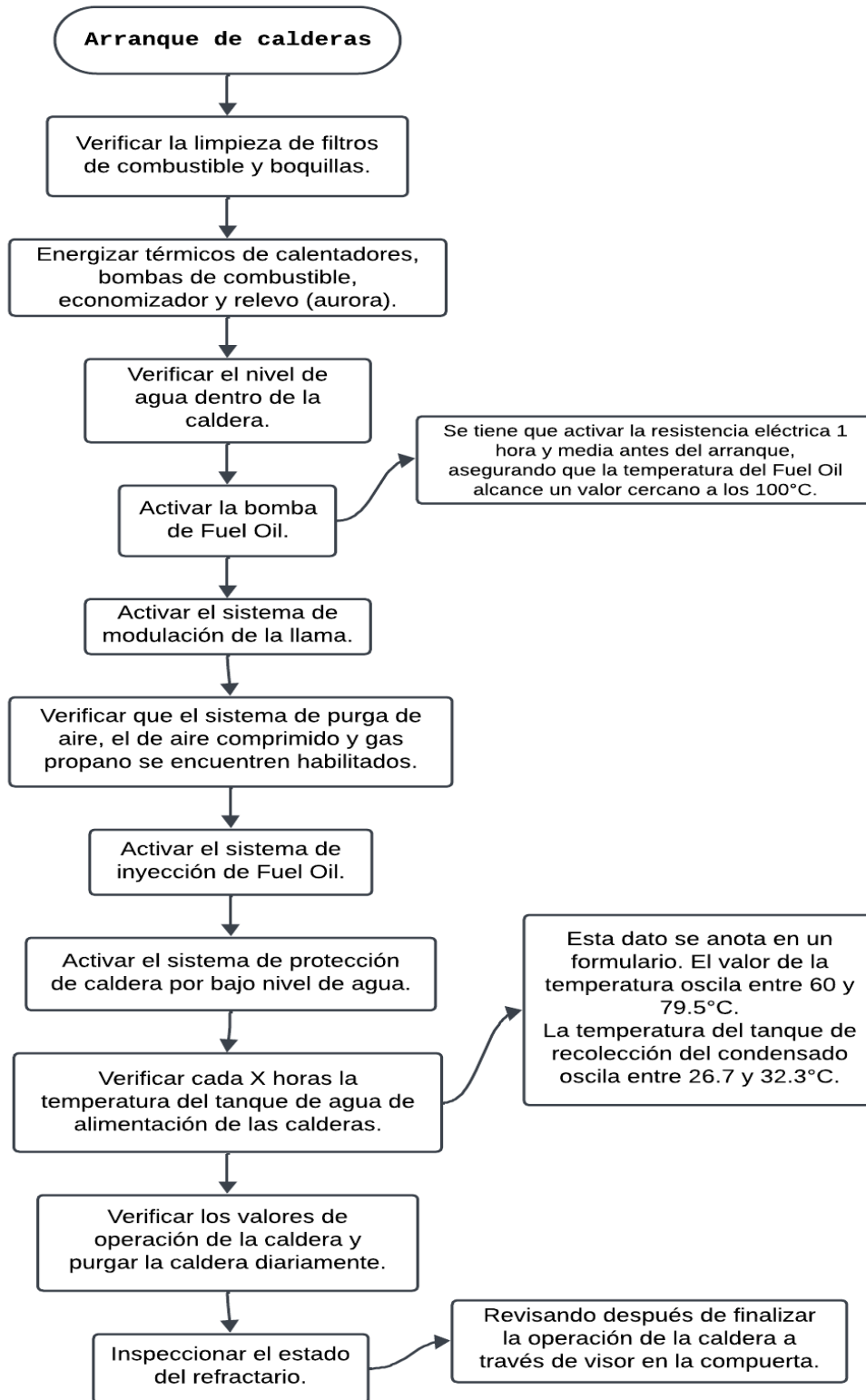


Figura 10.5. Diagrama de flujo del arranque del sistema de calderas

Análisis de los programas de operación y mantenimiento

➤ *Programas de mantenimiento existentes*

Si hay programas de mantenimiento existentes

➤ *Fechas de ejecución de los programas de mantenimiento, su problemática a nivel técnico y organizacional (si es que la hay).*

Los programas de mantenimiento se realizan siguiendo dos criterios;

1. En base a la confiabilidad. Asegurando que siempre estén disponibles a su máxima capacidad.
2. Variable, va apegado a la demanda. Otro criterio es en base a frecuencia, por requisito legal se le da mantenimiento 1 vez al año, por estándar de VPO (Voyager Plant Optimization) se hacen con frecuencia.

Existe una proyección que para diciembre de 2024 la caldera N° 1 (800 BHP) será la primera en migrar del combustible Bunker N° 6 (Fuel Oil) a gas propano, será dual con Fuel Oil y gas propano, y la caldera N° 3, que es la más pequeña (200 BHP) solo con gas propano. Luego para febrero de 2025 la caldera N° 2 (650 BHP) trabajará con gas propano.

10.1 Calibración de las calderas.

Según el registro de calibración para la combustión en las calderas, en el año 2024 se detallan a continuación la descripción del mantenimiento y la fecha en que se realizó.

Tabla 10.2. Fecha de calibración de las calderas

Descripción	Fecha calibración
Control y Automatización Calibración Caldera 200	29/11/2023
Calibración Caldera 200	06/04/2024
Calibración curva combustión Caldera 200	15/04/2024
Control y Automatización calibración de componentes Caldera 200	24/05/2024

Descripción	Fecha calibración
Control y Automatización Calibración Punto Combustión Caldera 650	22/12/2023
Control y Automatización Calibración Punto Combustión Caldera 650	09/01/2024
Calibración curva combustión Caldera 650	05/04/2024
Control y Automatización Calibración curva combustión Caldera 650	04/05/2024
Control y Automatización Calibración Caldera 800	26/12/2023
Control y Automatización Calibración Caldera 800	04/05/2024
Control y Automatización Calibración de caldera 800	21/06/2024

Mantenimiento de las calderas.

En la empresa donde se lleva a cabo el estudio de las calderas, se tienen 3 tipos de mantenimiento:

1. **Mantenimiento correctivo:** es aquel mantenimiento que se le da al equipo o máquina cuando ya está fallando o ha dejado de funcionar correctamente.
2. **Mantenimiento preventivo:** cuando el equipo o máquina comienza a dar signos de que en un tiempo cercano a la fecha comenzará a fallar o a dejar de trabajar de la manera idónea.
3. **Mantenimiento predictivo:** es el que se busca tener en todo lugar de trabajo, significa que, por medio de termografías, análisis de vibración, ultrasonido, análisis eléctrico y análisis de aceite, a través de estos estudios programados en el equipo se puede llegar a predecir en qué momento comenzará a fallar y mantenerlo en su condición óptima por mayor tiempo.

De la base de datos proporcionada por la empresa logramos obtener el listado de los **mantenimientos preventivos y predictivos** realizados en las calderas desde el año 2021 hasta la fecha actual (agosto del año 2024). Los mantenimientos que se realizan están programados según frecuencia y pueden ser realizados de forma anual, mensual o quincenal, hay algunos que requieren una frecuencia de 3 o 4 veces al año.

Para cada caldera se pueden desglosar el número de mantenimiento realizados desde el año 2021 hasta la fecha en el año 2024 en contraste con la frecuencia que se debería haber realizado.

Para el año 2024 el % de cumplimiento del mantenimiento ha sido el siguiente:

Tabla 10.3. Porcentaje de cumplimiento del programa de mantenimiento para el año 2024

Actividad de mantenimiento programado en el sistema de calderas (2024)	Frecuencia	Frecuencia Esperada	CALDERA 800		CALDERA 650		CALDERA 200	
			Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento	Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento	Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento
Ajuste menor en la caldera	Semanalmente	35	23	65.71%	28	80.00%	20	57.14%
Análisis de gases de combustión	Quincenalmente	18	26	144.44%	29	161.11%	20	111.11%
Certificación externa en caliente	6 veces Mensualmente	24	2	8.33%	2	8.33%	2	8.33%
Certificación externa en frío	Anualmente	1	-	-	-	-	1	100.00%
Inspección con ultrasonido para las trampas en la caldera	3 veces Mensualmente	24	-	-	1	4.17%	1	4.17%
Inspección de purgador automático	4 veces Mensualmente	32	-	-	2	6.25%	9	28.13%
Inspección de purgador automático	Mensualmente	8	-	-	-	-	1	12.50%
Inspección interna de armario eléctrico	3 veces Mensualmente	24	2	8.33%	-	-	-	-
Inspección panel control y de fuerza	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Inspección de calentadores eléctricos	3 veces Mensualmente	24	1	4.17%	-	-	1	4.17%
Inspección de calentadores eléctricos	4 veces Mensualmente	32	-	-	1	3.13%	-	-
Inspección de dispositivos de medición	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Inspección de quemador	3 veces Mensualmente	24	2	8.33%	-	-	-	-
Inspección de quemador	4 veces Mensualmente	32	-	-	2	6.25%	-	-
Inspección de quemador	Mensualmente	8	-	-	-	-	2	25.00%
Inspección de válvulas de seguridad	3 veces Mensualmente	24	2	8.33%	-	-	1	4.17%
Inspección de válvulas de seguridad	4 veces Mensualmente	32	-	-	2	6.25%	-	-
Inspección diaria de la caldera	Diariamente	244	24	9.84%	29	11.89%	19	7.79%

Actividad de mantenimiento programado en el sistema de calderas (2024)	Frecuencia	Frecuencia Esperada	CALDERA 800		CALDERA 650		CALDERA 200	
			Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento	Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento	Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento
Inspección de pantalla MK8	2 veces Mensualmente	16	-	-	3	18.75%	-	-
Integridad mecánica de la caldera	Anualmente	1	-	-	1	100.00%	-	-
Limpieza armarios eléctricos	4 veces Mensualmente	32	1	3.13%	1	3.13%	1	3.13%
Limpieza elementos varios caldera	Mensualmente	8	-	-	5	62.50%	-	-
Limpieza mensual	Mensualmente	8	7	87.50%	7	87.50%	7	87.50%
Limpieza quincenal	Quincenalmente	18	14	77.78%	14	77.78%	14	77.78%
Limpieza semanal	Semanalmente	35	28	80.00%	29	82.86%	29	82.86%
Mantenimiento del pre calentador de combustible	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento del purgador automático	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento de la válvula reguladora para agua caliente	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento de bomba de combustible	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento de control del nivel de agua en la caldera	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento de controles de presión	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento del cuerpo de la caldera	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento del motor del ventilador	Anualmente	1	-	-	-	-	1	100.00%
Mantenimiento del motor del ventilador	Anualmente	1	-	-	-	-	1	100.00%
Mantenimiento del sistema atomizador-aire	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%

Actividad de mantenimiento programado en el sistema de calderas (2024)	Frecuencia	Frecuencia Esperada	CALDERA 800		CALDERA 650		CALDERA 200	
			Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento	Frecuencia Cumplida	Frecuencia Cumplida	% Cumplimiento	Frecuencia Cumplida
Mantenimiento del sistema atomizador-vapor	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento de sistema de ignición	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento del sistema de modulación	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Mantenimiento de válvulas de seguridad	Anualmente	1	-	-	-	-	1	100.00%
Mantenimiento de calentadores eléctricos en la caldera	Anualmente	1	-	-	-	-	2	200.00%
Prueba de funcionamiento del sistema de emergencia	Mensualmente	8	5	62.50%	7	87.50%	6	75.00%

Fuente: Base de datos proporcionado por la empresa

A continuación, se presentan tres gráficos de la frecuencia esperada versus la frecuencia cumplida en el mantenimiento para el año 2024 de cada una de las calderas, facilitando la identificación de áreas que requieren mejoras o ajustes en la planificación de las intervenciones de mantenimiento.

El cumplimiento adecuado de estas actividades tiene la finalidad de garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la prolongación de la vida útil de los equipos.

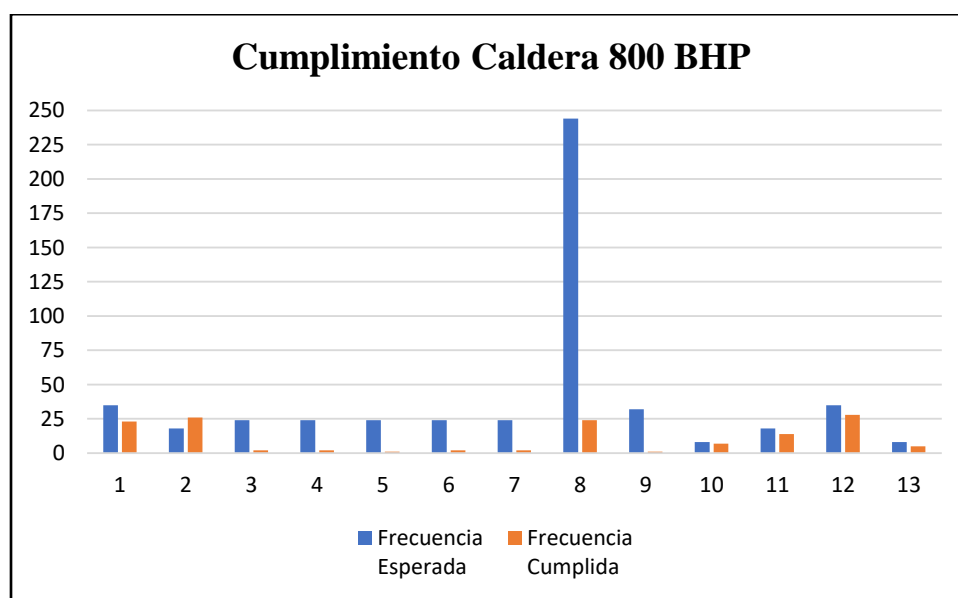


Gráfico 10.1. Cumplimiento del programa de mantenimiento para la caldera 800

1. AJUSTE MENOR CALDERA
2. ANALISIS GASES DE COMBUSTION CALDERA
3. CERTIFICACIÓN EXTERNA EN CALIENTE CALDERA
4. INSPECCIÓN INTERNA DE ARMARIO ELÉCTRICO
5. INSPECIÓN CALENTADORES ELÉCTRICOS CALDERA
6. INSPECCCIÓN QUEMADOR CALDERA
7. INSPECCIÓN VÁLVULAS SEGURIDAD CALDERA
8. INSPECCION DIARIA CALDERA
9. LIMPIEZA ARMARIOS ELÉCTRICOS CALDERA
10. LIMPIEZA MENSUAL CALDERA
11. LIMPIEZA QUINCENAL CALDERA
12. LIMPIEZA SEMANAL CALDERA
13. PRUEBA FUNCIONAMIENTO PRESIÓN EMERGIDA CALDERA

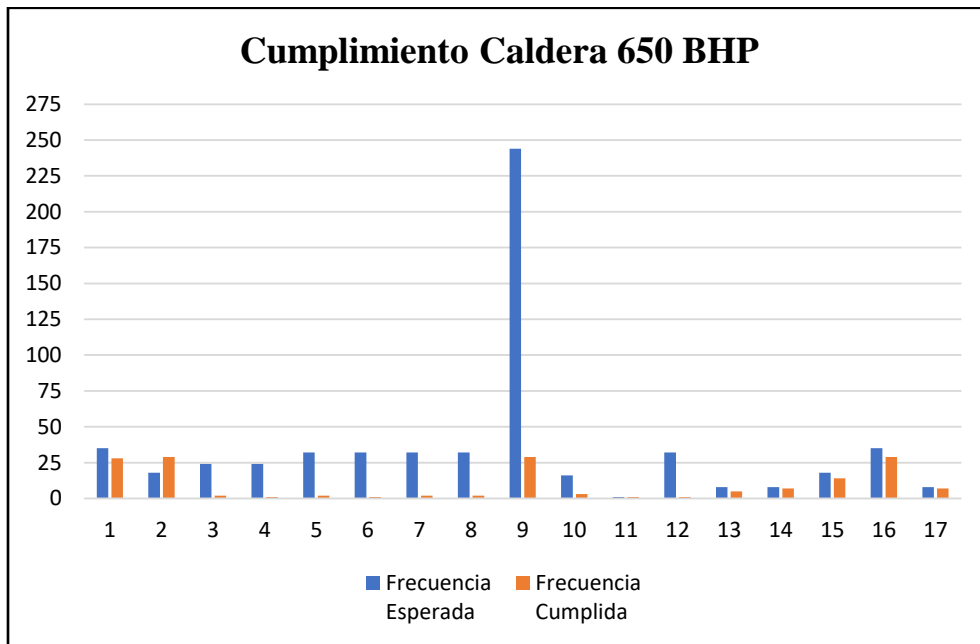


Gráfico 10.2. Cumplimiento del programa de mantenimiento para la caldera 650

1. AJUSTE MENOR CALDERA
2. ANALISIS GASES DE COMBUSTION CALDERA
3. CERTIFICACIÓN EXTERNA EN CALIENTE CALDERA
4. INSPECCIÓN ULTRASONIDO TRAMPAS CALDERA
5. INSPECCIÓN PURGADOR AUTOMATICO CALDERA
6. INSPECCIÓN CALENTADORES ELÉCTRICOS CALDERA
7. INSPECCIÓN QUEMADOR CALDERA
8. INSPECCIÓN VALVULAS SEGURIDAD CALDERA
9. INSPECCION DIARIA CALDERA
10. INSPECCION PANTALLA MK8 (2M)
11. INTEGRIDAD MECÁNICA CALDERA
12. LIMPIEZA ARMARIOS ELÉCTRICOS CALDERA
13. LIMPIEZA ELEMENTOS VARIOS CALDERA
14. LIMPIEZA MENSUAL CALDERA
15. LIMPIEZA QUINCENAL CALDERA
16. LIMPIEZA SEMANAL CALDERA
17. PRUEBA FUNCIONAM PRESIÓN EMERGIDA CALDERA

Cumplimiento Caldera 200 BHP

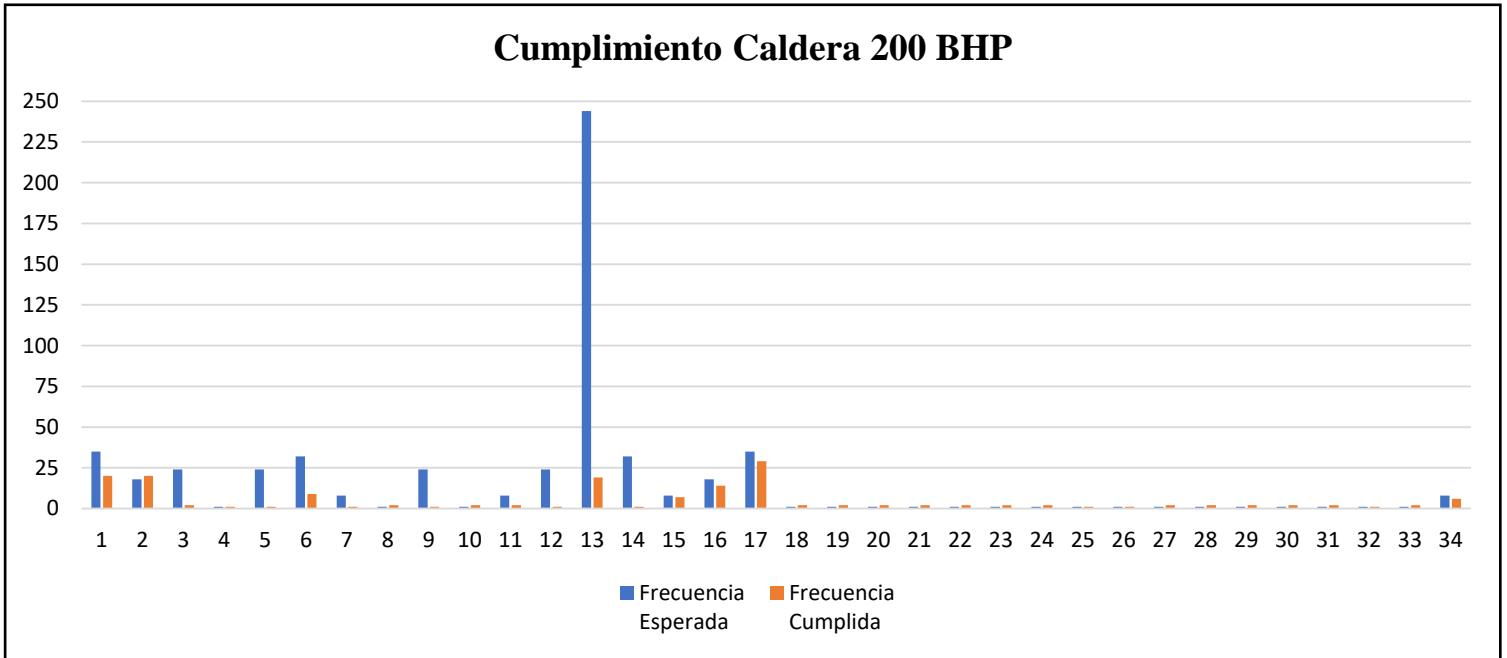


Gráfico 10.3. Cumplimiento del programa de mantenimiento para la caldera 200

1. AJUSTE MENOR CALDERA
2. ANALISIS GASES DE COMBUSTION CALDERA
3. CERTIFICACIÓN EXTERNO EN CALIENTE CALDERA
4. CERTIFICACION EXTERNO EN FRIO CALDERA
5. INSPECCIÓN ULTRASONIDO TRAMPAS CALDERA
6. INSPECCIÓN PURGADOR AUTOMATICO CALDERA
7. INSPECCIÓN PURGADOR AUTOMATICO CALDERA
8. INSPECCIÓN PANEL CONTROL/FUERZA CALDERA
9. INSPECCIÓN CALENTADORES ELECTRICOS CALDERA
10. INSPECCIÓN DISPOSICIÓN DE MEDICION CALDERA
11. INSPECCIÓN QUEMADOR CALDERA
12. INSPECCIÓN VALVULAS SEGURIDAD CALDERA
13. INSPECCION DIARIA CALDERA
14. LIMPIEZA ARMARIOS ELECTRICOS CALDERA
15. LIMPIEZA MENSUAL CALDERA
16. LIMPIEZA QUINCENAL CALDERA
17. LIMPIEZA SEMANAL CALDERA
18. MANTENIMIENTO PRECALENTADOR VAPOR-COMBUSTIBLE CALDERA

19. MANTENIMIENTO PURGADOR AUTOMATICO CALDERA
20. MANTENIMIENTO VALVULA REGULADORA AGUA CALDERA
21. MANTENIMIENTO BOMBA COMBUSTIBLE CALDERA
22. MANTENIMIENTO CONTROL NIVEL AGUA CALDERA
23. MANTENIMIENTO CONTROLES DE PRESION CALDERA
24. MANTENIMIENTO CUERPO CALDERA
25. MANTENIMIENTO MOTOR VENTILADOR CALDERA
26. MANTENIMIENTO MOTOR VENTILADOR CALDERA OC
27. MANTENIMIENTO PRECAL VAPOR-COMBUSTIBLE CALDERA
28. MANTENIMIENTO SISTEMA AIRE-ATOMIZACION CALDERA
29. MANTENIMIENTO SISTEMA VAPOR-ATOMIZA CALDERA
30. MANTENIMIENTO SISTEMA IGNICION CALDERA
31. MANTENIMIENTO SISTEMA MODULACION CALDERA
32. MANTENIMIENTO VALVULAS SEGURIDAD CALDERA
33. MANTENIMIENTO CALENTADORES ELÉCTRICOS CALDERA
34. PRUEBA FUNCIONAMIENTO PRESIÓN EMERGIDA CALDERA

11. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DATOS

➤ Análisis de los gases de chimenea

Caldera 200 BHP

Información General

Marca:	York Shipley	Tipo:	Pirotubular Wetback 3 Pasos	Capacidad:	200 BHP
Combustible:	Bunker	Diámetro de chimenea:	24"	Retenedor de gases:	Sombrero Chino

Mediciones y análisis de gases

Descripción	Símbolo	Unidad de medida	Lectura Fuego Bajo	Lectura Fuego Medio	Lectura Fuego Alto
Gases de Combustión					
Oxígeno	O ₂	%	7.4	6.2	4.4
Monóxido de Carbono	CO	mg/Nm ³	103.5	120.8	155.3
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	10.7	11.6	13.0
Gases Ambientales					
Óxido Nítrico	NO	mg/Nm ³	282.0	300.8	329.0
Dióxido Nítrico	NO ₂	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxidos de Nitrógeno	NO _x	mg/Nm ³	282.0	300.8	329.0
Dióxido de Azufre	SO ₂	mg/Nm ³	1572.0	1779.0	2358.0
Gases Ambientales Corregidos al 10% de O₂					
Monóxido de Carbono	CO (10)	mg/Nm ³	83.6	89.5	102.6
Óxido Nítrico	NO (10)	mg/Nm ³	227.7	223.0	217.3
Dióxido Nítrico	NO ₂ (10)	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxidos de Nitrógeno	NO _x (10)	mg/Nm ³	227.7	223.0	217.3
Dióxido de Azufre	SO ₂ (10)	mg/Nm ³	1269.2	1319.1	1557.7
Mediciones Relacionadas					
Temperatura de gases		°F	285.0	305.0	333.0
Temperatura ambiente		°F	92.0	92.0	95.0
Cálculos Relacionados					
Exceso de aire		%	54.0	42.0	27.0
Eficiencia de combustión		%	88.0	87.6	87.3

Fuente: Base de datos proporcionado por la empresa

Caldera 650 BHP

Información General

Marca:	Fulton	Tipo:	Pirotubular Wetback 4 Pasos	Capacidad:	650 BHP
Combustible:	Bunker	Diámetro de chimenea:	24"	Retenedor de gases:	Sombrero Chino

Mediciones y análisis de gases

Descripción	Símbolo	Unidad de medida	Lectura Fuego Bajo	Lectura Fuego Medio	Lectura Fuego Alto
Gases de Combustión					
Oxígeno	O ₂	%	7.9	4.5	5.0
Monóxido de Carbono	CO	mg/Nm ³	0.0	0.0	1.2
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	10.3	13.0	12.6
Gases Ambientales					
Óxido Nítrico	NO	mg/Nm ³	479.4	601.6	584.7
Dióxido Nítrico	NO ₂	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxidos de Nitrógeno	NO _x	mg/Nm ³	479.4	601.6	584.7
Dióxido de Azufre	SO ₂	mg/Nm ³	1731.8	2441.8	2486.4
Gases Ambientales Corregidos al 10% de O₂					
Monóxido de Carbono	CO (10)	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxido Nítrico	NO (10)	mg/Nm ³	402.0	399.8	400.8
Dióxido Nítrico	NO ₂ (10)	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxidos de Nitrógeno	NO _x (10)	mg/Nm ³	402.0	399.8	400.8
Dióxido de Azufre	SO ₂ (10)	mg/Nm ³	1452.1	1622.9	1704.5
Mediciones Relacionadas					
Temperatura de gases		°F	364.0	382.0	433.0
Temperatura ambiente		°F	82.0	82.0	82.0
Cálculos Relacionados					
Exceso de aire		%	60.0	27.0	31.0
Eficiencia de combustión		%	86.6	87.6	86.1

Fuente: Base de datos proporcionado por la empresa

Caldera 800 BHP

Información General

Marca:	York Shipley	Tipo:	Pirotubular Wetback 3 Pasos	Capacidad:	800 BHP
Combustible:	Bunker	Diámetro de chimenea:	24"	Retenedor de gases:	Sombrero Chino

Mediciones y análisis de gases

Descripción	Símbolo	Unidad de medida	Lectura Fuego Bajo	Lectura Fuego Medio	Lectura Fuego Alto
Gases de Combustión					
Oxígeno	O ₂	%	11.7	6.4	4.3
Monóxido de Carbono	CO	mg/Nm ³	1.9	4.6	2.3
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	7.3	11.5	13.1
Gases Ambientales					
Óxido Nítrico	NO	mg/Nm ³	270.7	389.2	421.1
Dióxido Nítrico	NO ₂	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxidos de Nitrógeno	NO _x	mg/Nm ³	270.7	389.2	421.1
Dióxido de Azufre	SO ₂	mg/Nm ³	1880.0	2900.3	3144.0
Gases Ambientales Corregidos al 10% de O₂					
Monóxido de Carbono	CO (10)	mg/Nm ³	2.2	3.5	1.5
Óxido Nítrico	NO (10)	mg/Nm ³	320.7	292.5	276.5
Dióxido Nítrico	NO ₂ (10)	mg/Nm ³	0.0	0.0	0.0
Óxidos de Nitrógeno	NO _x (10)	mg/Nm ³	320.7	292.5	276.5
Dióxido de Azufre	SO ₂ (10)	mg/Nm ³	2227.4	2180.3	2064.4
Mediciones Relacionadas					
Temperatura de gases		°F	330.0	343.0	360.0
Temperatura ambiente		°F	89.0	92.0	92.0
Cálculos Relacionados					
Exceso de aire		%	126.0	44.0	26.0
Eficiencia de combustión		%	85.4	88.2	88.4

Fuente: Base de datos proporcionado por la empresa

➤ **Balance de materia**

11.1.1. ANÁLISIS DE LOS CONSUMOS PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA.

De la base de datos compartida por la empresa, se puede estimar un consumo diario con el promedio diario del histórico desde el 1° de septiembre de 2023 hasta el 31 de agosto de 2024.

Base: Año de 366 días (año bisiesto).

Entradas.

El consumo anual del combustible en el rango temporal mencionado fue de 879,641 galones. El vapor total generado al año considerando las 3 calderas funcionando es de aproximadamente 42, 268,812 kg (42,268.81 TON de vapor). El consumo para cada caldera se distribuye de la siguiente forma:

Tabla 11.1. Cálculo del consumo diario de agua y combustible

Caldera	Volumen de combustible entrando promedio diario en galones	Volumen de agua entrando promedio diario en m³
200	226.13 galones (82,764 gal anuales)	14.66 m ³ (5,364 m ³ anuales)
650	2,013.96 galones (737,111 gal anuales)	121.46 m ³ (44,455 m ³ anuales)
800	163.30 galones (59,766 gal anuales)	7.93 m ³ (2,901 m ³ anuales)

Salidas.

Al dividir la producción anual entre el número de días, se tiene que en promedio de forma diaria se generaron: **115.5 TON de vapor al día.**

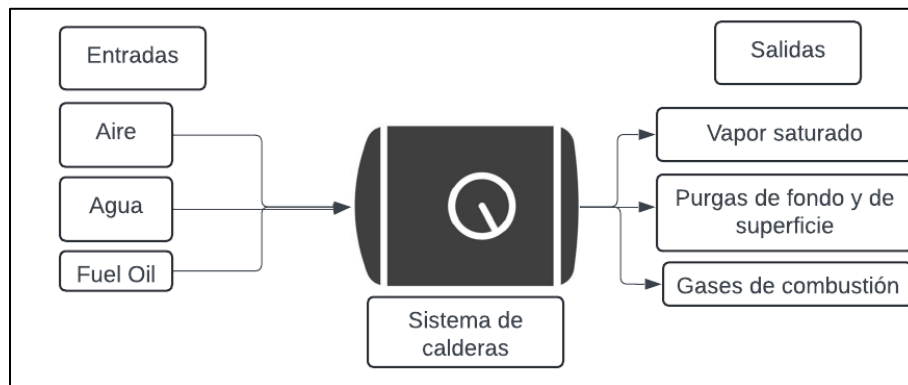


Figura 11.1. Esquema de entradas y salidas en el sistema de calderas

Para conocer la masa de vapor saturado producido por cada caldera se procede a utilizar la siguiente ecuación:

$$\textit{masa del vapor saliendo} = \textit{masa del agua entrando} - \textit{masa de la purga de agua}$$

La optimización en las purgas al interior del sistema de calderas como resultado de la automatización por medición de la conductividad en el agua, además de mejorar la eficiencia, permite asumir en el balance un valor constante del 5%. Por lo tanto, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\textit{masa de la purga de agua} = (0.05) * \textit{masa del agua entrando}$$

$$\textit{masa del vapor saliendo} = (0.95) * \textit{masa del agua entrando}$$

Por el lado del combustible, para conocer la masa de los gases de chimenea saliendo en cada caldera se iguala el total de fuel oil entrando para cada una, si bien se puede conocer el total en kg de los gases generados, no se posee el alcance para conocer la concentración y la masa de cada uno de los gases de chimenea saliendo, por lo que para tener datos útiles del sistema de combustión se consultará un análisis de los gases de chimenea proporcionado por la empresa en la sección anterior “Análisis de los gases de chimenea”.

$$\textit{masa del combustible entrando} = \sum \textit{masa de los gases de chimenea}$$

$$\text{masa del combustible entrando} = \text{masa } O_2 + \text{masa } CO + \text{masa } CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x$$

11.1.2 CONVERSIÓN DE UNIDADES.

Los datos proporcionados por la empresa (tomados de los contadores de agua y fuel oil) son datos en volumen, es entonces necesario convertir los datos de volúmenes a masa con el apoyo de la densidad de ambas sustancias, para el agua la densidad es de $977.9 \frac{kg}{m^3}$ (a $69.75^\circ C$) mientras que para el combustible fuel oil es $0.9713 \frac{kg}{L}$ (a $15^\circ C$).

El dato de la densidad del fuel oil fue proporcionado por la empresa, que se especifica en la ficha técnica del combustible de parte del proveedor UNO.

Para el fuel oil que entra precalentado a la caldera, a la entrada se tiene una temperatura de $40^\circ C$, por lo que es necesario utilizar una relación.

Para calcular la densidad de un fluido a una temperatura diferente, se puede utilizar la relación que tiene en cuenta la expansión térmica del fluido, según lo establece la Norma Industrial ASTM D1250, la fórmula aproximada es:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \beta * (T_2 - T_1)}$$

Dónde:

- ρ_2 es la densidad a la nueva temperatura.
- ρ_1 es la densidad a la temperatura inicial.
- β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica del fluido.
- T_2 es la nueva temperatura.
- T_1 es la temperatura inicial.

Para una temperatura de $40^\circ C$ la densidad del fuel oil es aproximadamente $0.955 \frac{kg}{L}$.

Considerando $1 \text{ gal}=3.7854 \text{ L}$.

Se realizan las conversiones necesarias para trabajar en unidades del sistema internacional (kg).

Tabla 11.2. Conversión de unidades en el balance de masa

Caldera	Masa de combustible entrando	Masa de agua entrando
200	$226.1 \text{ gal} \left(\frac{3.7854 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \right) \left(\frac{0.955 \text{ kg}}{1 \text{ L}} \right) = 817.5 \text{ kg}$	$14.66 \text{ m}^3 \left(977.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 14,331.85 \text{ kg}$
650	$2013.96 \text{ gal} \left(\frac{3.615 \text{ kg}}{1 \text{ gal}} \right) = 7,280.60 \text{ kg}$	$121.46 \text{ m}^3 \left(977.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 118,777.44 \text{ kg}$
800	$163.30 \text{ gal} \left(\frac{3.7854 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \right) = 590.32 \text{ kg}$	$7.93 \text{ m}^3 \left(977.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 7,751.06 \text{ kg}$

11.1.3 CÁLCULOS DEL BALANCE DE MASA EN EL SISTEMA DE CALDERAS.

Base de cálculo: 1 día de operación

❖ Caldera 200

Fluido: Agua

$$\text{masa del vapor saliendo} = (0.95) * \text{masa del agua entrando}$$

$$\text{masa del vapor saliendo} = (0.95) * (14,331.85 \text{ kg}) = 13,615.25 \text{ kg}$$

$$\text{masa de la purga de agua} = (0.05) * \text{masa del agua entrando}$$

$$\text{masa de la purga de agua} = (0.05) * (14,331.85 \text{ kg}) = 716.59 \text{ kg}$$

Fluido: Combustible Fuel Oil

$$\text{masa del combustible entrando} = \text{masa de los gases de chimenea saliendo}$$

$$\text{masa de los g. c} = (\text{masa } O_2 + \text{masa } CO + \text{masa } CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x)$$

$$(masa O_2 + masa CO + masa CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x) = 817.5 \text{ kg}$$

❖ **Caldera 650**

Fluido: Agua

$$masa \text{ del vapor saliendo} = (0.95) * masa \text{ del agua entrando}$$

$$masa \text{ del vapor saliendo} = (0.95) * (118,777.44 \text{ kg}) = 112,838.57 \text{ kg}$$

$$masa \text{ de la purga de agua} = (0.05) * masa \text{ del agua entrando}$$

$$masa \text{ de la purga de agua} = (0.05) * (118,777.44) = 5,938.37 \text{ kg}$$

Fluido: Combustible Fuel Oil

$$masa \text{ del combustible entrando} = masa \text{ de los gases de chimenea saliendo}$$

$$masa \text{ de los g.c} = (masa O_2 + masa CO + masa CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x)$$

$$(masa O_2 + masa CO + masa CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x) = 7,280.60 \text{ kg}$$

❖ **Caldera 800**

Fluido: Agua

$$masa \text{ del vapor saliendo} = (0.95) * masa \text{ del agua entrando}$$

$$masa \text{ del vapor saliendo} = (0.95) * (7,751.06 \text{ kg}) = 7,363.51 \text{ kg}$$

$$masa \text{ de la purga de agua} = (0.05) * masa \text{ del agua entrando}$$

$$masa \text{ de la purga de agua} = (0.05) * (7,751.06 \text{ kg}) = 387.55 \text{ kg}$$

Fluido: Combustible Fuel Oil

masa del combustible entrando = masa de los gases de chimenea saliendo

masa de los g. c = (masa O_2 + masa CO + masa CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x)

(masa O_2 + masa CO + masa CO_2 + NO + NO_2 + SO_2 + NO_x) = 590.32 kg

➤ Balance de energía

11.1.4 CÁLCULOS DEL BALANCE DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE CALDERAS.

Para realizar el balance de energía en las calderas se deben conocer los parámetros de presión y temperatura, las condiciones de operación a la entrada y salida del sistema. Además de considerar que a la entrada se tienen 2 fluidos en estado líquido y a la salida 2 fluidos en estado gaseoso, cediendo el calor de parte de los gases de combustión y ganando calor de parte del vapor de agua.

$$Q_{\text{ganado del agua}} = -Q_{\text{perdido de los gases de combustión}}$$

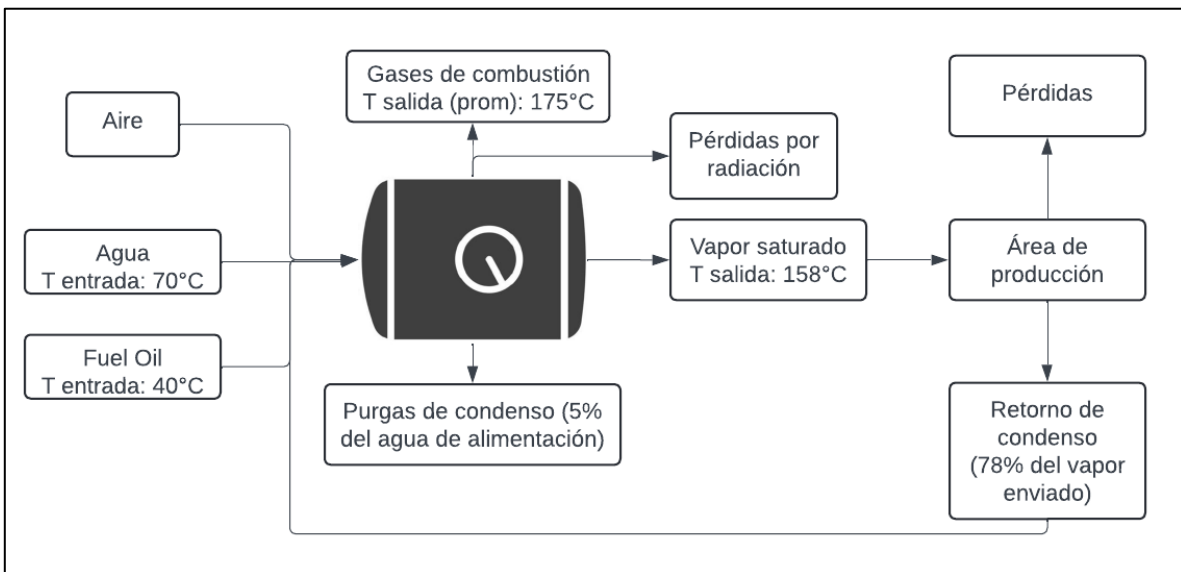


Figura 11.2. Esquema de transferencia de calor en el sistema de calderas.

Como fórmula general para calcular la eficiencia de cada caldera es necesario conocer cuánto del calor suministrado es aprovechado para la producción de vapor a las condiciones de temperatura y presión establecidas. De esta forma se obtiene el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{Q_{\text{aprovechado}}}{Q_{\text{suministrado}}}$$

$$Q_{\text{suministrado}} = m_{\text{combustible}} * P.C_{\text{combustible}}$$

$$Q_{\text{aprovechado}} = Q_{\text{util}} - Q_{\text{perdidas}}$$

$$Q_{\text{util}} = (m_{\text{agua alimentada}} - m_{\text{agua en purgas}}) * (H_{\text{final}} - H_{\text{inicial}})$$

Siendo:

H_{final} : entalpia del vapor a la salida

H_{inicial} : entalpia del agua a la entrada

La eficiencia también se puede calcular de la siguiente forma:

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{Q_{\text{util}}}{Q_{\text{suministrado}}} - (P_{g.c.} + P_{cr})$$

Siendo:

$P_{g.c.}$ (*Siegert*) = %perdido en los gases de combustión o de chimenea

P_{cr} (*Tabla genérica ABMA*) = %perdido en la radiacion y convección al ambiente

11.1.5. CÁLCULO DEL CALOR ÚTIL

Es la cantidad de calor introducido a la caldera y utilizado para el calentamiento del agua hasta la temperatura de ebullición, su evaporación y el sobrecalentamiento del vapor. Para obtener los datos termodinámicos correspondientes se procede a considerar un proceso **isobárico**, donde la presión del sistema (la caldera) opera a 85 psig.

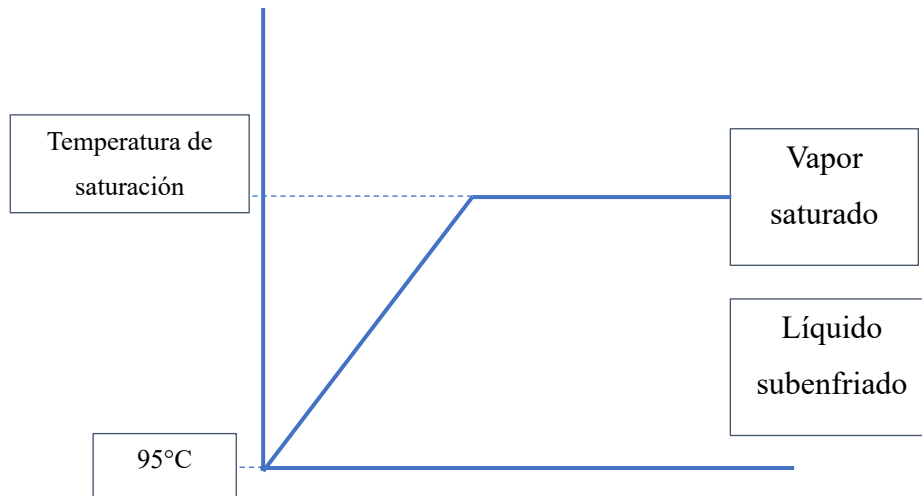


Figura 11.3. Diagrama del proceso isobárico para el agua

El agua de alimentación para cada caldera entra a una temperatura de 95°C, como una mezcla de corrientes, de parte del retorno de condensado con 98°C y del agua de relleno con 40°C.

Para calcular el calor útil, que es equivalente a la cantidad de calor absorbido por el fluido se incluyen únicamente 2 estados: líquido subenfriado (energía que toma calentar el agua hasta la ebullición) y vapor saturado (estado en el que sale el vapor de la caldera).

11.1.5.1 Cálculo de la entalpia del líquido subenfriado.

Siendo líquido subenfriado se obtiene la entalpia a la temperatura y presión en la entrada de la caldera con las tablas para líquido subenfriado y vapor sobrecalentado (Tablas IAPWS).

El agua entrando a la caldera está en condiciones normales, a una presión de 1 atmósfera o 101300 Pa (0.10 MPa).

Para una presión de 0.10 MPa y una temperatura de 95°C se tiene que la entalpia es de **398.10 kJ/kg**. Que será H_1 para el balance energético del fluido que gana calor (agua).

Tabla 11.3. Datos termodinámicos para líquido subenfriado y vapor sobrecalentado (agua) en el SI.

0.10 MPa ($t_s = 99.606\text{ °C}$)				$t_s, \text{°C}$	0.11 MPa ($t_s = 102.292\text{ °C}$)				$t_s, \text{°C}$	0.12 MPa ($t_s = 104.784\text{ °C}$)			
v	ρ	h	s		v	ρ	h	s		v	ρ	h	s
1.043 15	958.63	417.50	1.3028	$t_s(L)$	1.045 27	956.69	428.84	1.3330	$t_s(L)$	1.047 27	954.86	439.36	1.3609
1693.9	0.590 34	2674.9	7.3588	$t_s(V)$	1549.5	0.645 39	2679.2	7.3269	$t_s(V)$	1428.4	0.700 10	2683.1	7.2977
<i>1.000 16</i>	<i>999.84</i>	<i>0.06</i>	<i>-0.000 15</i>	0	<i>1.000 15</i>	<i>999.85</i>	<i>0.07</i>	<i>-0.000 15</i>	0	<i>1.000 15</i>	<i>999.85</i>	<i>0.08</i>	<i>-0.000 15</i>
1.000 03	999.97	21.12	0.076 25	5	1.000 03	999.97	21.13	0.076 25	5	1.000 02	999.98	21.14	0.076 25
1.000 30	999.70	42.12	0.151 08	10	1.000 29	999.71	42.13	0.151 08	10	1.000 29	999.71	42.14	0.151 08
1.000 90	999.10	63.08	0.224 45	15	1.000 89	999.11	63.09	0.224 45	15	1.000 89	999.11	63.09	0.224 45
1.001 80	998.21	84.01	0.296 46	20	1.001 79	998.21	84.02	0.296 46	20	1.001 79	998.22	84.02	0.296 46
1.002 96	997.05	104.92	0.367 20	25	1.002 96	997.05	104.93	0.367 20	25	1.002 95	997.06	104.94	0.367 19
1.004 37	995.65	125.82	0.436 73	30	1.004 37	995.65	125.83	0.436 72	30	1.004 36	995.66	125.84	0.436 72
1.006 00	994.03	146.72	0.505 10	35	1.006 00	994.04	146.73	0.505 09	35	1.005 99	994.04	146.74	0.505 09
1.007 85	992.22	167.62	0.572 37	40	1.007 84	992.22	167.62	0.572 36	40	1.007 84	992.22	167.63	0.572 36
1.009 88	990.21	188.51	0.638 58	45	1.009 88	990.22	188.52	0.638 57	45	1.009 88	990.22	188.53	0.638 57
1.012 11	988.03	209.42	0.703 77	50	1.012 11	988.04	209.43	0.703 76	50	1.012 10	988.04	209.43	0.703 76
1.014 52	985.69	230.33	0.767 98	55	1.014 51	985.70	230.34	0.767 98	55	1.014 51	985.70	230.34	0.767 97
1.017 09	983.20	251.25	0.831 25	60	1.017 09	983.20	251.26	0.831 25	60	1.017 08	983.20	251.26	0.831 24
1.019 84	980.55	272.18	0.893 61	65	1.019 83	980.55	272.19	0.893 60	65	1.019 83	980.56	272.19	0.893 60
1.022 74	977.76	293.12	0.955 09	70	1.022 74	977.77	293.13	0.955 09	70	1.022 73	977.77	293.14	0.955 08
1.025 81	974.84	314.08	1.0157	75	1.025 80	974.85	314.09	1.0157	75	1.025 80	974.85	314.10	1.0157
1.029 03	971.79	335.05	1.0755	80	1.029 02	971.79	335.06	1.0755	80	1.029 02	971.80	335.07	1.0755
1.032 41	968.61	356.05	1.1346	85	1.032 40	968.62	356.06	1.1346	85	1.032 40	968.62	356.06	1.1346
1.035 94	965.31	377.06	1.1928	90	1.035 93	965.31	377.07	1.1928	90	1.035 93	965.32	377.08	1.1928
1.039 62	961.89	398.10	1.2504	95	1.039 62	961.89	398.11	1.2504	95	1.039 61	961.90	398.12	1.2504
1695.9	0.589 67	2675.8	7.3610	100	1.043 46	958.35	419.17	1.3072	100	1.043 45	958.36	419.18	1.3072

11.1.5.2 Cálculo de la entalpia del vapor saturado.

Con ayuda de las tablas de IAPWS se obtiene también el dato de entalpia, del valor a la salida de esta, porque sale como **vapor saturado**.

A 85 psig (586,054.37 Pa).

Para 0.586 MPa.

Tabla 11.4. Tabla de datos termodinámicos para vapor saturado.

p , MPa	t_s , °C	Density, kg/m ³		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)			Volume, cm ³ /g	
		ρ_L	ρ_V	h_L	h_V	Δh	s_L	s_V	Δs	v_L	v_V
0.15	111.349	949.92	0.862 60	467.13	2693.1	2226.0	1.4337	7.2230	5.7893	1.052 73	1159.3
0.16	113.297	948.41	0.916 29	475.38	2696.0	2220.7	1.4551	7.2014	5.7463	1.054 40	1091.4
0.17	115.148	946.97	0.969 76	483.22	2698.8	2215.6	1.4753	7.1812	5.7059	1.056 00	1031.2
0.18	116.911	945.57	1.0230	490.70	2701.4	2210.7	1.4945	7.1621	5.6676	1.057 56	977.47
0.19	118.596	944.23	1.0761	497.85	2703.9	2206.0	1.5127	7.1440	5.6313	1.059 06	929.24
0.20	120.210	942.94	1.1291	504.70	2706.2	2201.5	1.5302	7.1269	5.5967	1.060 52	885.68
0.21	121.759	941.68	1.1818	511.29	2708.5	2197.2	1.5469	7.1106	5.5638	1.061 93	846.14
0.22	123.250	940.47	1.2345	517.63	2710.6	2193.0	1.5628	7.0951	5.5323	1.063 30	810.07
0.23	124.686	939.28	1.2869	523.74	2712.7	2188.9	1.5782	7.0803	5.5021	1.064 64	777.04
0.24	126.072	938.13	1.3393	529.64	2714.6	2185.0	1.5930	7.0661	5.4731	1.065 94	746.68
0.25	127.411	937.02	1.3915	535.34	2716.5	2181.1	1.6072	7.0524	5.4452	1.067 22	718.66
0.26	128.708	935.93	1.4436	540.87	2718.3	2177.4	1.6210	7.0394	5.4184	1.068 46	692.73
0.27	129.965	934.86	1.4955	546.24	2720.0	2173.8	1.6343	7.0268	5.3925	1.069 68	668.65
0.28	131.185	933.83	1.5474	551.44	2721.7	2170.3	1.6471	7.0146	5.3675	1.070 86	646.24
0.29	132.370	932.81	1.5992	556.50	2723.3	2166.8	1.6596	7.0029	5.3433	1.072 03	625.33
0.30	133.522	931.82	1.6508	561.43	2724.9	2163.5	1.6717	6.9916	5.3199	1.073 17	605.76
0.31	134.644	930.85	1.7024	566.22	2726.4	2160.2	1.6835	6.9807	5.2972	1.074 29	587.41
0.32	135.737	929.90	1.7539	570.90	2727.8	2157.0	1.6949	6.9701	5.2752	1.075 39	570.17
0.33	136.802	928.96	1.8052	575.46	2729.3	2153.8	1.7060	6.9598	5.2538	1.076 47	553.95
0.34	137.842	928.05	1.8565	579.91	2730.6	2150.7	1.7168	6.9498	5.2330	1.077 53	538.64
0.35	138.857	927.15	1.9077	584.26	2732.0	2147.7	1.7274	6.9401	5.2128	1.078 57	524.18
0.36	139.849	926.27	1.9589	588.52	2733.2	2144.7	1.7377	6.9307	5.1931	1.079 60	510.50
0.37	140.819	925.40	2.0099	592.68	2734.5	2141.8	1.7477	6.9216	5.1739	1.080 61	497.53
0.38	141.769	924.55	2.0609	596.75	2735.7	2139.0	1.7575	6.9126	5.1551	1.081 61	485.22
0.39	142.698	923.71	2.1119	600.74	2736.9	2136.2	1.7671	6.9040	5.1369	1.082 59	473.52
0.40	143.608	922.89	2.1627	604.65	2738.1	2133.4	1.7765	6.8955	5.1190	1.083 55	462.38
0.42	145.375	921.28	2.2642	612.25	2740.3	2128.0	1.7946	6.8791	5.0846	1.085 44	441.65
0.44	147.076	919.72	2.3655	619.58	2742.4	2122.8	1.8120	6.8636	5.0516	1.087 29	422.74
0.46	148.716	918.20	2.4666	626.64	2744.4	2117.7	1.8287	6.8487	5.0199	1.089 08	405.42
0.48	150.300	916.73	2.5674	633.47	2746.3	2112.8	1.8448	6.8344	4.9895	1.090 84	389.50
0.50	151.831	915.29	2.6680	640.09	2748.1	2108.0	1.8604	6.8207	4.9603	1.092 55	374.81
0.52	153.314	913.89	2.7685	646.50	2749.9	2103.4	1.8754	6.8075	4.9321	1.094 23	361.20
0.54	154.753	912.52	2.8688	652.72	2751.5	2098.8	1.8899	6.7948	4.9049	1.095 87	348.58
0.56	156.149	911.18	2.9689	658.77	2753.1	2094.4	1.9040	6.7825	4.8786	1.097 48	336.82
0.58	157.506	909.87	3.0689	664.65	2754.7	2090.0	1.9176	6.7707	4.8531	1.099 05	325.85
0.60	158.826	908.59	3.1687	670.38	2756.1	2085.8	1.9308	6.7592	4.8284	1.100 60	315.58
0.62	160.112	907.34	3.2684	675.96	2757.6	2081.6	1.9437	6.7482	4.8045	1.102 12	305.96
0.64	161.365	906.11	3.3680	681.41	2758.9	2077.5	1.9562	6.7374	4.7813	1.103 62	296.91
0.66	162.587	904.91	3.4675	686.73	2760.3	2073.5	1.9684	6.7270	4.7587	1.105 09	288.40
0.68	163.781	903.72	3.5668	691.92	2761.5	2069.6	1.9802	6.7169	4.7367	1.106 54	280.36

Interpolando las presiones en MPa para obtener la temperatura de saturación se obtiene (con ayuda de un programa de interpolación) que, la temperatura de saturación es **157.902°C**.

Temperatura (°C)	Entalpia Vapor saturado (kJ/kg)
157.506	2754.7
157.902	2755.12 (H₂ vapor saturado)
158.826	2756.1

Para una temperatura de 157.92°C se establece que la entalpia es igual a 2,755.12 kJ/kg.

Base de cálculo: 1 día de operación

Sustituyendo con los datos calculados en el balance de masa se tiene:

❖ Caldera 200

Cálculo del calor útil:

$$Q_{\text{util}} = Q_{\text{absorbido por el fluido}}$$

$$Q_{\text{absorbido por el fluido}} = (14,331.85 \text{ kg} - 716.59 \text{ kg}) \left(2,755.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 398.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}} \right)$$

$$Q_{\text{absorbido por el fluido}} = 32,091.44 \text{ MJ}$$

❖ Caldera 650

Cálculo del calor útil:

$$Q_{\text{absorbido por el fluido}} = (118,777.4 \text{ kg} - 5,938.9 \text{ kg}) \left(2,755.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 398.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}} \right)$$

$$Q_{\text{absorbido por el fluido}} = 265,962.601 \text{ MJ}$$

❖ Caldera 800

Cálculo del calor útil:

$$Q_{\text{absorbido por el fluido}} = (7,751.06 \text{ kg} - 387.55 \text{ kg}) \left(2,755.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 398.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}} \right)$$

$$Q_{\text{absorbido por el fluido}} = 17,355.94 \text{ MJ}$$

11.2.1. CÁLCULO DEL CALOR SUMINISTRADO

$$Q_{\text{suministrado}} = Q_{\text{combustible}} = m_{\text{combustible}}(\text{P. C})$$

El poder calorífico (P.C) del fuel oil puede variar ligeramente dependiendo de su composición específica, pero generalmente se encuentra en el rango de:

- Poder calorífico inferior (PCI): aproximadamente $39-42 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.
- Poder calorífico superior (PCS): aproximadamente $41-44 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.

El PCI considera la energía liberada sin incluir el calor de condensación del vapor de agua en los productos de la combustión, mientras que el PCS incluye este calor.

Para los próximos cálculos se establecerá que el poder calorífico del fuel oil es de $39.97 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ (dato proporcionado por el especialista de la empresa encargado del área de calderas).

Base de cálculo: 1 día de operación

❖ Caldera 200

Cálculo del calor suministrado:

$$Q_{\text{suministrado}} = Q_{\text{combustible}} = m_{\text{combustible}}(\text{P. C})$$

$$Q_{\text{combustible}} = (817.48 \text{ kg}) \left(39.97 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_{\text{combustible}} = 32,674.55 \text{ MJ}$$

❖ Caldera 650

Cálculo del calor suministrado:

$$Q_{\text{suministrado}} = Q_{\text{combustible}} = m_{\text{combustible}}(\text{P. C})$$

$$Q_{\text{combustible}} = (7,280.60 \text{ kg}) \left(39.97 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_{\text{combustible}} = 291,005.44 \text{ MJ}$$

❖ Caldera 800

Cálculo del calor suministrado:

$$Q_{\text{suministrado}} = Q_{\text{combustible}} = m_{\text{combustible}}(P.C)$$

$$Q_{\text{combustible}} = (590.32 \text{ kg}) \left(39.97 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_{\text{combustible}} = 23,595.13 \text{ MJ}$$

11.2.2 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR GASES DE COMBUSTIÓN O DE CHIMENEA

Para calcular estas pérdidas se utilizará la ecuación de Siegert, una fórmula española que permite conocer el % de pérdidas de calor por gases de combustión en base al %CO₂ presente en los gases de combustión y en base a las diferencias de temperatura entre el aire y los gases de chimenea. Existen diferentes variaciones de esta ecuación, pero para el cálculo de interés de esta investigación, se hará referencia a la ecuación descrita en el trabajo de graduación de la Universidad de Sevilla, del año 2019, titulado “Revisión de métodos para la determinación de pérdidas y eficiencia energética en generadores de vapor” (Arjona 2019, p 26) cuya variación es la siguiente:

$$P_{g.c.} = K \frac{(T_g - T_a)}{\%CO_2}$$

Donde K depende del tipo de combustible utilizado, para el fueloil es:

$$K = 0.516 + 0.0067 * (\%CO_2)$$

T_g = temperatura de los gases de chimenea en Kelvin

T_a = temperatura del aire en Kelvin

$\%CO_2$ = % de CO₂ obtenido en el análisis de gases de chimenea

De la sección anterior “Análisis de los gases de chimenea” se obtiene el %CO₂ para cada una de las calderas. Recordando que una mayor concentración de CO₂ en los gases de chimenea significa una mayor eficiencia en la combustión.

❖ **Caldera 200**

Pérdidas en los gases de chimenea:

$$\%CO_2=11.6$$

$$T_g \text{ (promedio)} = 426.3 \text{ K}$$

$$T_a \text{ (promedio)} = 306.5 \text{ K}$$

$$P_{g.c.} = [0.516 + 0.0067 * (\%CO_2)] \frac{(T_g - T_a)}{\%CO_2}$$

$$P_{g.c.} = [0.516 + 0.0067 * (11.6)] \frac{(426.3 - 306.5)}{11.6}$$

$$P_{g.c.} = 6.13\%$$

❖ **Caldera 650**

Pérdidas en los gases de chimenea:

$$\%CO_2=13$$

$$T_g \text{ (promedio)}=473.7 \text{ K}$$

$$T_a \text{ (promedio)}=300.9 \text{ K}$$

$$P_{g.c.} = [0.516 + 0.0067 * (\%CO_2)] \frac{(T_g - T_a)}{\%CO_2}$$

$$P_{g.c.} = [0.516 + 0.0067 * (13)] \frac{(473.7 - 300.9)}{13}$$

$$P_{g.c.} = 8.02\%$$

❖ Caldera 800

Pérdidas en los gases de chimenea:

$$\%CO_2=11.5$$

$$T_g \text{ (promedio)}=446.67 \text{ K}$$

$$T_a \text{ (promedio)}=304.8 \text{ K}$$

$$P_{g.c.} = [0.516 + 0.0067 * (\%CO_2)] \frac{(T_g - T_a)}{\%CO_2}$$

$$P_{g.c.} = [0.516 + 0.0067 * (11.5)] \frac{(446.67 - 304.8)}{11.5}$$

$$P_{g.c.} = 7.32\%$$

11.2.3. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LA RADIACIÓN Y CONVECCIÓN AL AMBIENTE

Las pérdidas de calor por radiación y convección son independientes del combustible y representan la pérdida de calor a los alrededores de las superficies calientes de una caldera. Dependen principalmente del tamaño del equipo y la energía real a la salida con respecto a la máxima de diseño.

El gráfico de pérdida de radiación estándar de la Asociación de Fabricantes de Calderas de América (ABMA) es bastante satisfactorio para las calderas donde el horno y las superficies de intercambio de calor están encerrados en una carcasa. Las pérdidas convectivo-radiantes, P_{cr} , son proporcionales a la superficie externa de una unidad, mientras que la capacidad de la unidad es proporcional a su volumen. Por lo tanto, P_{cr} es mayor para las unidades pequeñas que las grandes. Desde el punto de vista de la eficiencia, es mejor tener una unidad operativa con funcionamiento cerca a la plena carga, que tener dos unidades que funcionan a media carga. Esto es

particularmente cierto para unidades más pequeñas. Para las calderas de vapor y generadores de agua a alta temperatura con energía útil de hasta 200,000 lb/h de vapor o 200 millones de Btu/h, y para una configuración convencional, tales como calderas compactas. (Arjona 2019, p 49-50)

P_{cr} puede ser calculado utilizando la tabla siguiente:

Tabla 11.5. Tabla del gráfico estándar de la ABMA para pérdidas por radiación

Max output, millions of Btu	100 %	80 %	60 %	50 %	40 %	20 %
10	1.60	2.00	2.67	3.20	4.00	8.00
20	1.05	1.31	1.75	2.10	2.62	5.25
30	0.84	1.05	1.40	1.68	2.10	4.20
40	0.73	0.91	1.22	1.46	1.82	3.65
50	0.66	0.82	1.10	1.32	1.65	3.30
60	0.62	0.78	1.03	1.24	1.55	3.10
70	0.59	0.74	0.98	1.18	1.48	2.95
80	0.56	0.70	0.93	1.12	1.40	2.80
90	0.54	0.68	0.90	1.08	1.35	2.70
100	0.52	0.65	0.87	1.04	1.30	2.60
120	0.48	0.60	0.80	0.96	1.20	2.40
140	0.45	0.56	0.75	0.90	1.12	2.25
160	0.43	0.54	0.72	0.86	1.08	2.15

$$Q_{ryc} = P_{cr} = \text{Pérdidas de calor por radiación y convección}$$

$$P_{cr} = (\text{ratio de operación}) * (\text{factor de tabla})$$

$$\text{ratio de operación} = \frac{\text{Carga promedio (carga de operación)}}{\text{Capacidad máxima de la caldera}}$$

El factor de tabla se obtiene con el ratio de operación en % y con la capacidad máxima en millones de BTU por hora. Para el sistema de tres calderas en estudio con una capacidad de 200 BHP, 650 BHP y 800 BHP respectivamente se utilizará el siguiente factor para obtener la capacidad máxima en las unidades requeridas:

$$1 \text{ BHP} = 33,475 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

❖ Caldera 200 BHP

Pérdidas por radiación y convección:

$$\text{ratio de operación} = \frac{1.5 \frac{\text{TON}}{\text{h}}}{3 \frac{\text{TON}}{\text{h}}} = 0.5 = 50\%$$

$$\text{Capacidad máxima} = 200 \text{ BHP} * \frac{33,475 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{1 \text{ BHP}} = 6,695,000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$\text{Capacidad máxima} = 6.695 \text{ mill} \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

En la tabla 11.5 se busca el valor para 50% y 6.695 millones de BTU por h. Para obtener el valor es necesario interpolar, por medio de una calculadora en línea se obtiene el porcentaje de pérdidas para la caldera 200 BHP:

$$P_{cr} = 0.5 * (3.563\%) = 1.7815\%$$

❖ Caldera 650 BHP

Pérdidas por radiación y convección:

$$\text{ratio de operación} = \frac{8 \frac{\text{TON}}{\text{h}}}{10 \frac{\text{TON}}{\text{h}}} = 0.8 = 80\%$$

$$\text{Capacidad máxima} = 650 \text{ BHP} * \frac{33,475 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{1 \text{ BHP}} = 21,758,750 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$\text{Capacidad máxima} = 21.758 \text{ mill} \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

En la tabla 11.5 se busca el valor para 80% y 21.758 millones de BTU por h. Para obtener el valor es necesario interpolar nuevamente, por medio de una calculadora en línea se obtiene el porcentaje de pérdida para la caldera 650 BHP:

$$P_{cr} = 0.8 * (1.2642\%) = 1.011\%$$

❖ Caldera 800 BHP

Pérdidas por radiación y convección:

$$\text{ratio de operación} = \frac{10 \frac{\text{TON}}{\text{h}}}{12 \frac{\text{TON}}{\text{h}}} = 0.833 = 83.33\%$$

$$\text{Capacidad máxima} = 800 \text{ BHP} * \frac{33,475 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{1 \text{ BHP}} = 26,780,000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$\text{Capacidad máxima} = 26.78 \text{ mill} \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

En la tabla 11.5 Buscamos el valor para 83.33% y 26.78 millones de BTU por h. Para obtener el valor es necesario realizar una interpolación doble, por medio de una calculadora en línea se obtiene el porcentaje de pérdida para la caldera 800 BHP:

$$P_{cr} = 0.8333 * (1.09\%) = 0.908\%$$

11.2.4. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EN CADA CALDERA

Ahora que se conoce el calor útil, el calor suministrado y las pérdidas de energía en los gases de chimenea y en la radiación y convección (debido a las superficies externas que se encuentran a una menor temperatura de la que tienen los gases de combustión), se puede calcular la eficiencia de cada una de las calderas, restándole al calor útil las pérdidas y dividiendo entre el calor suministrado por la quema del combustible fueloil. Es así como la eficiencia de la caldera será calculada con la siguiente ecuación.

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{Q_{\text{util}}}{Q_{\text{suministrado}}} - (P_{g.c.} + P_{cr})$$

❖ **Caldera 200 BHP**

$$\eta_{\text{caldera 200}} = \frac{Q_{\text{util}}}{Q_{\text{suministrado}}} - (P_{g.c.} + P_{cr})$$

$$\eta_{\text{caldera 200}} = \frac{32,091.44 \text{ MJ}}{32,674.56 \text{ MJ}} - \frac{6.13\% + 1.78\%}{100\%}$$

$$\eta_{\text{caldera 200}} = \mathbf{0.9031}$$

❖ **Caldera 650 BHP**

$$\eta_{\text{caldera 650}} = \frac{Q_{\text{util}}}{Q_{\text{suministrado}}} - (P_{g.c.} + P_{cr})$$

$$\eta_{\text{caldera 650}} = \frac{265,962.601 \text{ MJ}}{291,005.438 \text{ MJ}} - \frac{8.02\% + 1.011\%}{100\%}$$

$$\eta_{\text{caldera 650}} = \mathbf{0.8236}$$

❖ **Caldera 800 BHP**

$$\eta_{\text{caldera 800}} = \frac{Q_{\text{util}}}{Q_{\text{suministrado}}} - (P_{g.c.} + P_{cr})$$

$$\eta_{\text{caldera 800}} = \frac{17,355.94 \text{ MJ}}{23,595.13 \text{ MJ}} - \frac{7.32\% + 0.908\%}{100\%}$$

$$\eta_{\text{caldera 800}} = 0.6533$$

➤ **Rendimiento del sistema de retorno de condensado**

El agua que entra a las calderas proviene de los pozos que posee la propia empresa, sin embargo, para ahorrar agua y maximizar su uso se cuenta con un sistema de retorno de condensado que consiste en mandar vapor a las diferentes áreas productivas (Elaboración y Envasado) y las áreas devuelven el condensado del vapor ya utilizado y sub enfriado.

Para representar de manera visual y clara la distribución de la energía en cada caldera, a continuación, se presentan tres diagramas de Sankey. Estos diagramas permiten observar cómo se distribuye el calor generado en cada caldera, identificando las proporciones de energía útil aprovechada y las pérdidas de calor. El grosor de las flechas en cada diagrama es proporcional a la cantidad de energía transferida o perdida, facilitando la identificación de las ineficiencias y oportunidades de mejora.

➤ **Diagramas de Sankey**

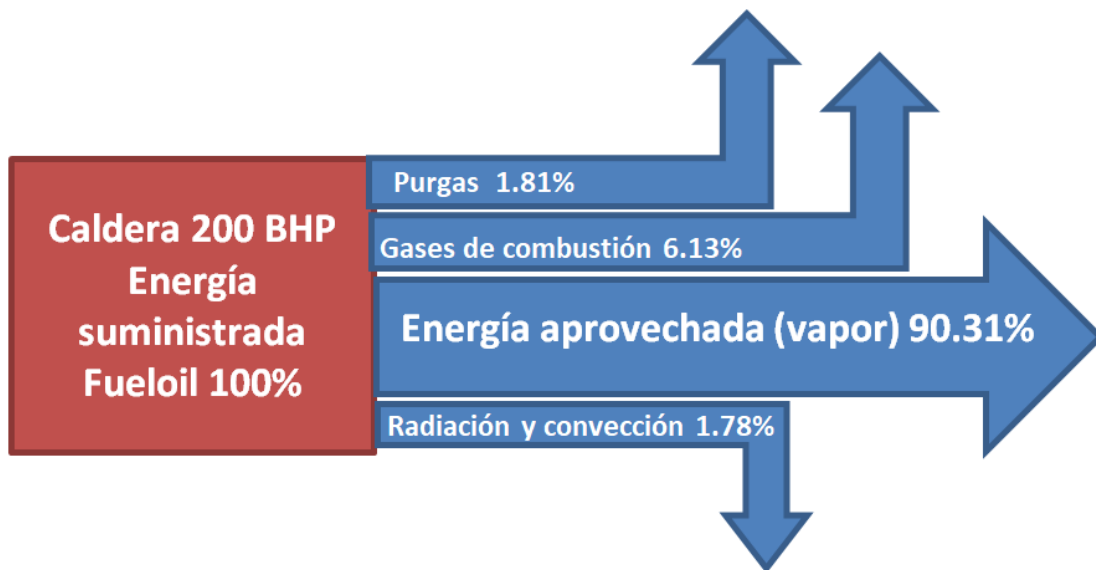


Figura 11.4. Diagrama de Sankey para la caldera 200 BHP en base a su eficiencia y pérdidas de calor.

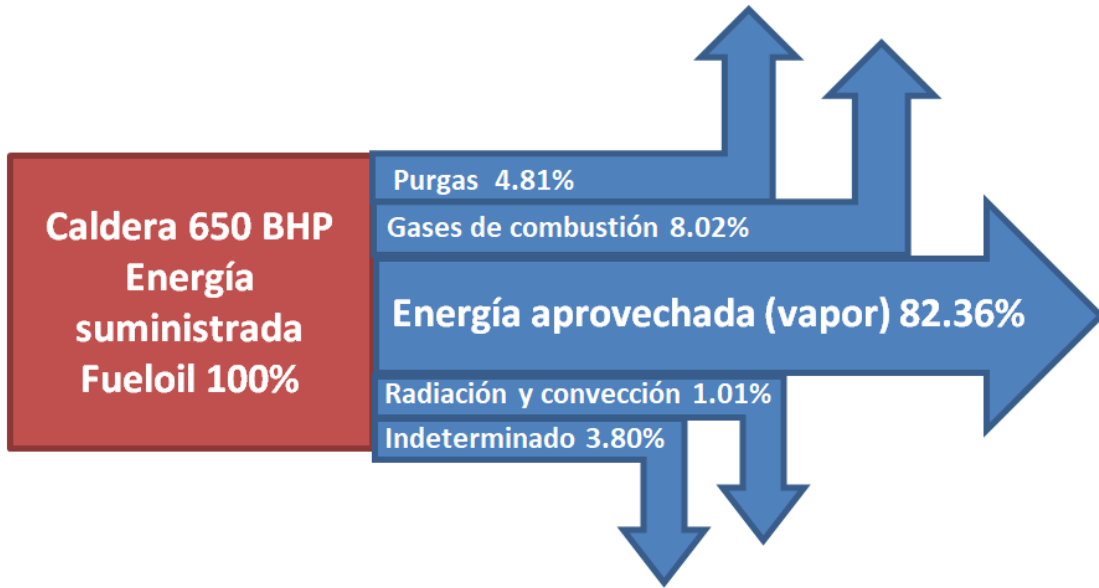


Figura 11.5. Diagrama de Sankey para la caldera 650 BHP en base a su eficiencia y pérdidas de calor.

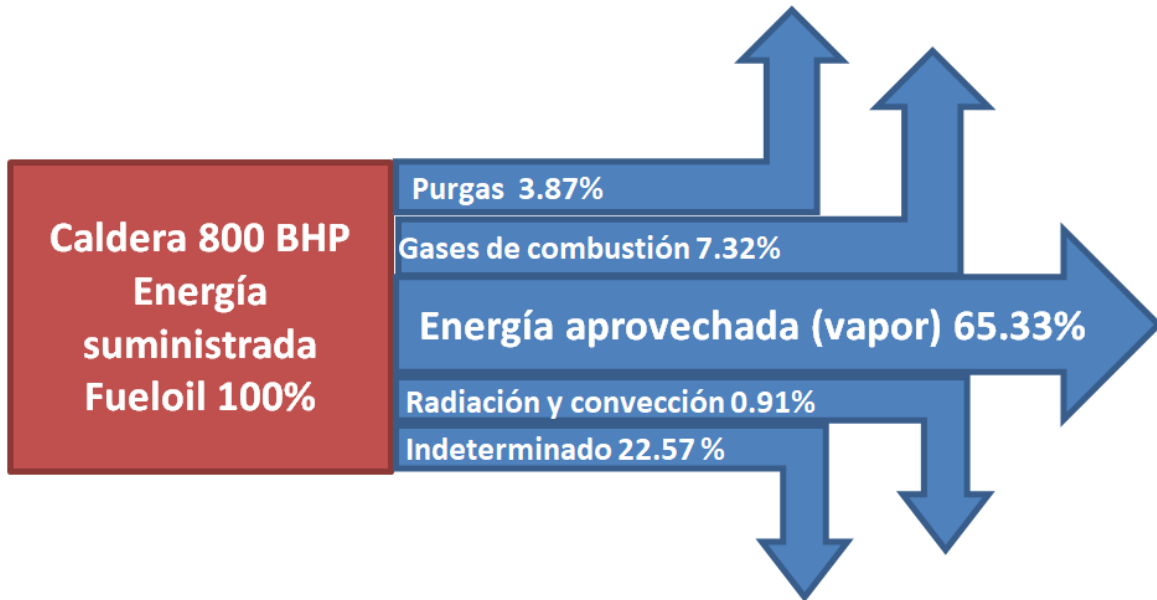


Figura 11.6. Diagrama de Sankey para la caldera 800 BHP en base a su eficiencia y pérdidas de calor.

En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de agua retornada a las calderas por mes:

Tabla 11.6. Porcentaje del retorno de condensa mensual 2024

Mes -2024	% de retorno
Enero	76.27%
Febrero	79.17%
Marzo	75.54%
Abril	74.08%
Mayo	76.60%
Junio	74.93%
Julio	75.06%
Mes -2024	% de retorno
Agosto	77.94%
Septiembre	81.85%
Promedio	76.78%

En el año 2023 el promedio anual del retorno de condensa tuvo un valor de 73.15% vs el promedio anual 2024 76.78%. Se puede observar que, los diferentes esfuerzos para maximizar el ahorro en el consumo de agua para alimentar las calderas han sido efectivos, ya que actualmente se recupera un mayor porcentaje. Sin embargo, para lograr una mejor eficiencia en el sistema térmico de la planta cervecera es necesario aumentar el % de retorno de condensa. Se puede proyectar la meta mensual de ir alcanzando el 80%, luego el 85% y así sucesivamente.

➤ **Análisis de los gases de chimenea.**

Los gases de chimenea son aquellos productos de la reacción de combustión entre el combustible, en el caso de estudio el fueloil y el Oxígeno. La cantidad de oxígeno mínima necesaria para quemar todos los componentes del combustible completamente depende de la composición del combustible. En una combustión ideal la relación entre el Carbono del combustible y el Oxígeno tiene que ser igual a 1. Cuando se tiene el caso de aire en exceso significa que entra más Oxígeno del que teóricamente es necesario para la oxidación del Carbono.

La combustión correctamente ajustada se debe llevar a cabo con un ligero exceso de aire para minimizar la concentración de CO y maximizar la formación de CO₂, recordando que, si no aportamos suficiente oxígeno, ahogamos la llama. Con estas consideraciones en mente minimizamos las pérdidas por chimenea.

Las pérdidas por chimenea, además, están impactadas por la energía que debemos utilizar con el Nitrógeno del aire que estamos aportando para la combustión, no interviene en la combustión, sólo lo calentamos.

El análisis de los gases de chimenea es una herramienta sumamente útil para saber la eficiencia de la combustión al interior de las calderas. Los componentes son:

- N₂
- O₂
- CO₂
- CO
- NO_x (NO y NO₂)
- SO₂

A continuación, se analizarán las posibles causas y ajustes en caso de tener un valor fuera de lo normal para los gases de combustión de una caldera de fueloil:

1. Monóxido de Carbono (CO)

Rango típico: 50 - 200 ppm

Causa: Combustión incompleta por falta de oxígeno o mezcla deficiente del aire y el combustible.

Control: Ajuste del aire de combustión y mantenimiento de quemadores.

2. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Rango típico: 150 - 300 ppm (a 3% O₂)

Causa: Se forman a altas temperaturas debido a la combinación del nitrógeno del aire con el oxígeno.

Control: Utilización de sistemas de baja NO_x o tecnologías de reducción selectiva catalítica (SCR).

3. Dióxido de Azufre (SO₂)

Rango típico: 200 - 1,500 ppm (dependiendo del contenido de azufre en el fueloil)

Causa: El SO₂ proviene del azufre presente en el combustible.

Control: Uso de fueloil con bajo contenido de azufre (<1%) o instalación de depuradores (scrubbers).

4. Oxígeno Residual (O₂)

Rango típico: 4 - 6%

Causa: Indica exceso de aire; es necesario para evitar la combustión incompleta, pero en exceso puede reducir la eficiencia energética.

Control: Ajuste de la proporción aire-combustible para mantener niveles óptimos.

5. Dióxido de Carbono (CO₂)

Rango típico: 10 - 15%

Causa: Indica una buena combustión si se mantiene en niveles altos, dado que refleja una conversión eficiente del carbono en el fueloil en CO₂.

Control: Si es bajo, puede indicar fugas de aire o combustión incompleta.

Tabla 11.7. Tabla Resumen para el análisis de gases de chimenea

Contaminante	Rango típico (ppm)	Notas
Monóxido de Carbono (CO)	50 - 200	Combustión incompleta
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	150 - 300	Aumenta con la temperatura
Dióxido de Azufre (SO₂)	200 - 1,500	Depende del contenido de azufre
Oxígeno (O₂)	4 - 6%	Exceso de aire controlado
Dióxido de Carbono (CO₂)	10 - 15%	Indicador de eficiencia
Partículas (MP)	50 - 100 mg/m ³	Control mediante filtros

A continuación, se analizarán los resultados reales obtenidos en el análisis de chimenea para cada caldera según los valores típicos de la concentración de cada uno de los gases de combustión.

Se le colocará en norma cuando el valor se encuentre dentro de los valores típicos:

Tabla 11.8. Resultados del análisis de gases de chimenea

GASES DE COMBUSTIÓN	CALDERA 200 BHP	CALDERA 650 BHP	CALDERA 800 BHP
O ₂ (4% - 6%)	En norma	En norma	Fuera de norma
CO ₂ (10% - 15%)	En norma	En norma	Fuera de norma
CO (50 ppm–200 ppm)	En norma	Ausencia	Fuera de norma
NO (10ppm–200 ppm)	En norma	Fuera de norma	En norma
NO ₂ (10ppm–200 ppm)	Ausencia	Ausencia	Ausencia
SO ₂ (200–1500 ppm)	En norma	En norma	En norma

Observaciones:

- Exceso de Oxígeno a fuego bajo para la caldera 800 BHP (11.7 %O₂)
- Concentración de NO (297.5 ppm) arriba de los valores típicos en caldera 650 BHP
- Bajo % de CO₂ a fuego bajo en caldera 800 BHP (7.3%)
- Baja concentración de CO en caldera 800 BHP (1.48 ppm)

12. APLICACIÓN DE OPCIONES DE ECOEFICIENCIA DE SISTEMAS DE VAPOR

Se evaluaron todas las medidas de ahorro posibles, haciendo una lista de verificación de áreas de oportunidad de ahorro por tipo de aplicación. En este paso, se revisaron diferentes opciones de eco-eficiencia para verificar si estas se aplicaban en el sistema de calderas. Dicha verificación se llevó a cabo por medio de una **entrevista con el especialista del área**, los resultados se presentan a continuación:

Tabla 12.1. Medidas de ahorro de energía propuestas a la empresa.

Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia		¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
1	Instalar aislamiento térmico en líneas, accesorios, tanques y otros elementos calientes que carece de éste	Parcialmente. Se tiene un porcentaje de avance del 90 a 95% implementado en sala de calderas, 85% a nivel de planta.	“Hay estrategias para alcanzar el 100%”
2	Ajuste de la relación aire combustible, tendiente a valores estequiométricos, en función del tipo de combustible y de las condiciones operativas del sistema de combustión	No se implementa la medida.	“Las calibraciones se realizan en función de la curva de combustión, pero no se tiene control automático del excedente de oxígeno. Dichas curvas parametrizadas, se miden cada 15 días, en caso de desviación se genera el aviso a mantenimiento.”

	Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia	¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
3	Eliminar fugas de vapor	De forma parcial. Si tienen fugas de en las áreas productivas, pero específicamente en el área de calderas no hay ninguna fuga de vapor.	“No se tienen fugas, pero hay presencia de plumas de vapor porque no se puede cerrar el tanque de condensado (porque ya es muy viejo) y porque los usuarios mandan el condensado con vapor aún porque las trampas de condensado no están bien. Entonces contra presionan el tanque y puede estallar. Por eso se deja abierto, en lugar de cerrado.”
4	Recuperar condensados para su reingreso a la caldera, minimizando el uso de agua de reposición	Si se aplica la medida.	“Ya se hace.”
5	Aprovechar el calor de las purgas de la caldera para calentar algún fluido	Si se aplica la medida.	“Se utiliza para calentar el agua suave (agua de relleno).”

Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia	¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
<p>6</p> <p>Optimizar las purgas en la caldera, en función de las recomendaciones del fabricante de calderas y de referencias imparciales y técnica</p>	<p>Si se implementa.</p>	<p>“Las referencias son técnicas, porque va en base al tratamiento de agua, como se inyecta bastante condensado eso disminuye las purgas que se deben hacer. El sistema de purgas está automatizado, no dependen del operador y está parametrizado en base a las características del agua (conductividad), esto es aplicable para la purga de superficie, sin embargo, la purga de fondo si es manual, una vez al día para eliminar lodos.”</p>
<p>7</p> <p>Aprovechar el calor de los gases de la chimenea para calentar algún Ácido útil, evitando la formación de ácido sulfhídrico</p>	<p>No se aplica la medida.</p>	<p>“Se tienen 2 economizadores en la 200 BHP y 800 BHP, pero están dañados, para la caldera de 4 pasos (la 650 BHP) los gases salen con menor temperatura por eso no se le instala economizador. Al migrar a gas propano se utilizarán evaporadores condensativos, como no tienes azufre se puede reutilizar.”</p>

Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia	¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
<p>8 Revisar, dar mantenimiento, reemplazar y/o implementar trampas para condensado</p>	<p>“El trapeo de vapor está a cargo y es responsabilidad de los usuarios. No se implementa en un 100%. Hay oportunidades de mejora”</p>	
<p>9 Para empresas con más de una caldera en operación, procurar la administración eficiente de la carga de las calderas (demanda de vapor en proceso)</p>	<p>“Esta medida si se implementa, la caldera de base es la 650 BHP que produce 10 ton por hora, mientras que el consumo promedio de la planta se encuentra entre 6 y 8 ton/h. Esta se mantiene trabajando todo el tiempo, sin embargo, cuando la demanda de los usuarios excede la capacidad de la caldera de base entra a apoyar la caldera 200 BHP y si todavía no satisface la demanda entra de último la caldera 800 BHP.”</p>	
<p>10 Reducir la presión del generador de vapor, hasta presiones adecuadas para el proceso, considerando las pérdidas por la red de distribución de vapor</p>	<p>Si se aplica, pero se podría reducir más.</p>	<p>“Se trabaja con las presiones bajas, sin embargo, si es muy baja la presión la línea 4 se queja de baja presión porque está en el punto más lejano al área de calderas. En el ideal, debería ser un anillo, para que la presión sea la misma en todas las áreas, pero no es así actualmente, es una línea recta.”</p>

Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia		¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
11	Instalar un serpentín de vapor en un tanque de agua caliente para alguna operación.	Si se cumple. Existen oportunidades de mejora en las áreas productivas.	“Se cuenta con un serpentín omega para calentar el combustible como parte de la medida de precalentar el combustible antes de entrar a la caldera.”
12	Aislamiento-camisas lámina galvanizada en marmitas, tanques calientes en proceso	Datos no disponibles en el momento. Se debe consultar con otra área.	
13	Uso de caldera alterna por mejor eficiencia	Si se aplica la medida.	“Por ejemplo, cuando hay baja demanda que solo se queda trabajando línea 2 (por ejemplo) queda trabajando la caldera pequeña únicamente (200 BHP). Está automatizado.”
14	Desincrustación de tuberías internas en calderas	Si se aplica la medida.	“Cada vez que le haces la apertura, una vez al año, para la respectiva limpieza del lado agua se revisa o se buscan señales de incrustación. Sin embargo, desde hace 10 años que no se ve incrustación.”
15	Acondicionar el combustible antes de quemarlo	Si se aplica la medida.	

	Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia	¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
16	Instalar piernas colectoras de condensados	No se aplica la medida.	“Se tienen pocos puntos con esta mejora por la misma infraestructura de la planta.”
17	Reemplazar la caldera actual de baja eficiencia, por una caldera nueva más eficiente	No se aplica la medida.	“Si se ha considerado, pero es excede el presupuesto, el período de retorno de la inversión máximo que se aprueba es de 2 años y cambiar una caldera tiene un período superior en el retorno de la inversión.”
18	Remplazar el sistema de combustión actual por uno nuevo de mayor eficiencia y adecuado al tipo de combustible	Si se aplica la medida.	“En el proceso se optó por un cambio de combustible porque tiene menor impacto al medio ambiente y te permite generar un mayor ahorro. Es importante mencionar que, la caldera 800 (menos eficiente) es del año 1973.”
19	Instalar un economizador para aprovechar el calor de los humos	No se aplica la medida.	“Se comenzará a aplicar con el economizador condensativo cuando se migre a gas propano.”
20	Cambio de combustible	Si se aplica la medida. Existe el proyecto para migrar de Fuel Oil a Gas Propano.	

	Medidas de ahorro de energía que permiten mejorar la eficiencia	¿Se implementa o no?	Respuesta brindada por el experto del área
21	Instalar acumulador de vapor	No se aplica la medida.	
22	Adecuar o retirar tuberías inactivas	Si se aplica la medida.	“Hay, un 2% de tuberías inactivas que no se han desinstalado en toda la planta. Reiterando que, la adecuación o retiro de estas depende de cada área, en el caso de los usuarios, si existen oportunidades de mejora en ese sentido.”
23	Implementar nueva red de distribución de vapor	No se aplica la medida.	“Excede el presupuesto y no rinde cuentas.”
24	Uso del agua de pozo para aprovechar la temperatura y enviarlo hacia alguna operación	No se aplica la medida.	“No se cuenta con agua de pozos calientes.”

13. CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO

1. Identificar las fuentes de emisiones de GEI:

Las emisiones de gases de efecto invernadero que interesan al estudio del sistema de calderas provienen de la energía consumida por el combustible

2. Recopilar datos sobre el consumo de combustible:

Los datos obtenidos del combustible BUNKER N° 6 (Fuel Oil) que se utilizarán en el cálculo de la huella de carbono son los siguientes:

Tabla 13.1. Datos del combustible Bunker N° 6 para cálculo de Huella de Carbono

IDENTIFICACIÓN	CALDERA 1 800 BHP	CALDERA 2 650 BHP	CALDERA 3 200 BHP
Capacidad (TON vapor/h)	12	10	3
Horas de operación/año	253	6932	3306
Consumo de combustible (gal/h)	210	185	58
Tipo de Combustible	Bunker N° 6 (Fuel Oil)	Bunker N° 6 (Fuel Oil)	Bunker N° 6 (Fuel Oil)
Factor de emisión (kg CO₂/L de combustible)	3.101 (Incertidumbre: inferior 3.57%, superior 3.65%)	3.101 (Incertidumbre: inferior 3.57%, superior 3.65%)	3.101 (Incertidumbre: inferior 3.57%, superior 3.65%)

3. Realizar cálculos de emisiones: Se utilizarán los datos recopilados para calcular las emisiones totales de GEI asociadas con el uso de energía térmica en el sistema de calderas.

La huella de carbono se calcula con la siguiente fórmula directa:

$$\text{Emisiones (kg CO}_2\text{)} = \text{factor de emisión (kg CO}_2\text{/un)} \times \text{consumo de energía (un)}$$

Donde el consumo de energía es la cantidad de combustible utilizado expresado en las cantidades correspondientes.

Entonces la Huella de Carbono para el sistema de Calderas para un año de operación se calcula:

$$Emisiones = \left[3.101 \frac{kg CO_2}{L \text{ combustible}} \times \frac{3.7854 L}{1 gal} \right] \left[\left(210 \frac{gal}{h} \right) (253 h) \right. \\ \left. + \left(185 \frac{gal}{h} \right) (6932 h) + \left(58 \frac{gal}{h} \right) (3306 h) \right]$$

$$Emisiones = 17928226.3664 \text{ kg } CO_2$$

$$Emisiones = 17,928.2264 \text{ TON } CO_2$$

$$Variación de las emisiones (límite inferior) = 17288.1887 \text{ TON } CO_2$$

$$Variación de las emisiones (límite superior) = 18582.6066 \text{ TON } CO_2$$

Desglosando las emisiones de CO₂ por cada una de las calderas obtenemos los siguientes datos:

Tabla 13.2. Emisiones de CO₂ en toneladas anuales para cada caldera operando con Fuel Oil.

Consumos	Caldera 1 800 BHP	Caldera 2 650 BHP	Caldera 3 200 BHP
Combustible (gal/h)	210.00	185.00	58.00
Horas de operación/año	253.00	6,932.00	3,306.00
Factor de emisión kg CO ₂ /litro de combustible	3.101	3.101	3.101
Ton de CO ₂ al año	623.67	15,053.72	2,250.84

Del total de emisiones de CO₂ equivalente a 17,928.23 TON al año, el porcentaje de emisiones para cada caldera se distribuye de la siguiente forma:

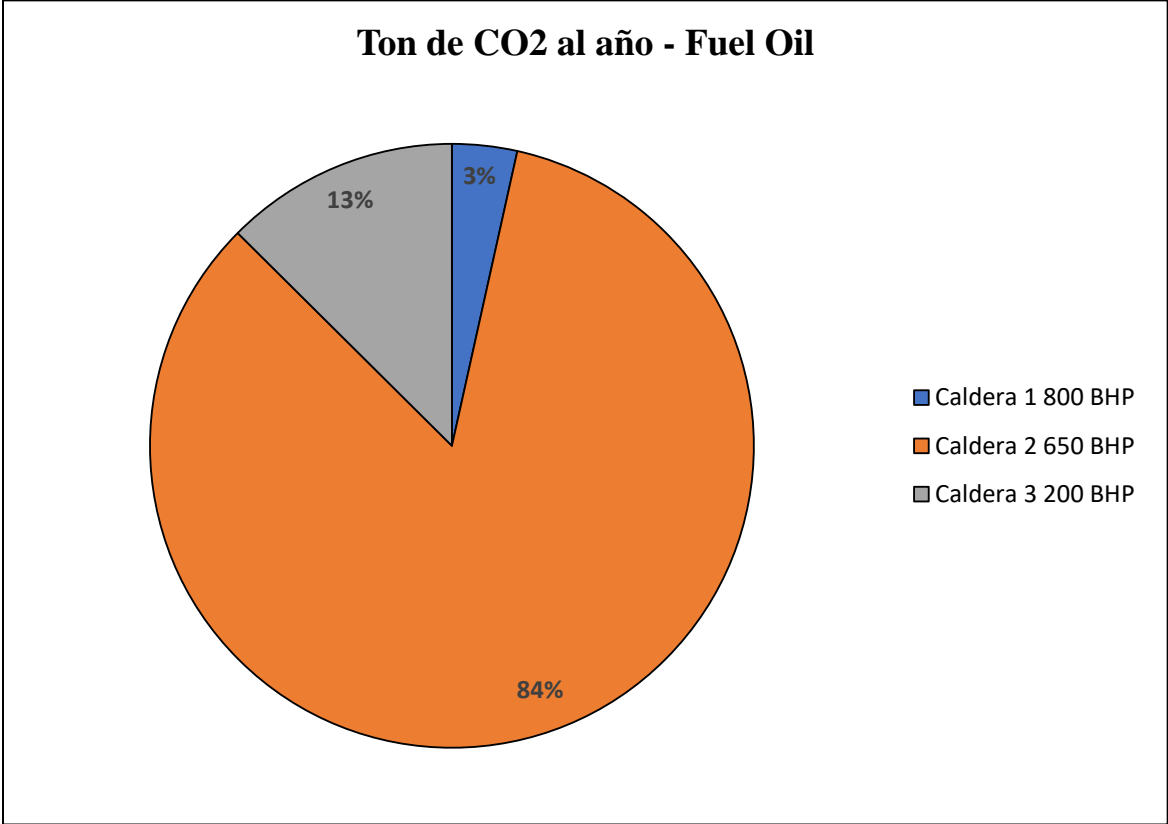


Gráfico 13.1. Porcentajes de emisiones anuales de cada caldera.

Se puede observar en el gráfico 13.1 que la caldera que genera una mayor cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono al año es la caldera número 2 de 650 BHP. Esto se debe a que es la caldera de base, es decir, la que más se utiliza para la generación de vapor.

Si el Sistema de Calderas ahora operara con Gas Propano (como se tiene para 2025), las emisiones de CO₂ serán:

Tabla 13.3. Datos del combustible Gas Licuado Propano para cálculo de Huella de Carbono

Tipo de Combustible	LPG	LPG	LPG
Factor de emisión (kg CO₂/L de combustible)	1.611 (Incertidumbre: inferior 8.41%, superior 9.16%)	1.611 (Incertidumbre: inferior 8.41%, superior 9.16%)	1.611 (Incertidumbre: inferior 8.41%, superior 9.16%)

Entonces la Huella de Carbono para el sistema de Calderas para un año de operación con Gas Propano se calcula:

$$Emisiones = \left[1.611 \frac{kg CO_2}{L \text{ combustible}} \times \frac{3.7854 L}{1 gal} \right] \left[\left(210 \frac{gal}{h} \right) (253 h) + \left(185 \frac{gal}{h} \right) (6932 h) + \left(58 \frac{gal}{h} \right) (3306 h) \right]$$

$$Emisiones = 9313889.9311 \text{ kg } CO_2$$

$$Emisiones = 9,313.8899 \text{ TON } CO_2$$

$$Variación de las emisiones (límite inferior) = 8530.5918 \text{ TON } CO_2$$

$$Variación de las emisiones (límite superior) = 10167.0422 \text{ TON } CO_2$$

Desglosando las emisiones de CO₂ por cada una de las calderas obtenemos los siguientes datos:

Tabla 13.4. Emisiones de CO₂ en toneladas anuales para cada caldera operando con GLP.

Consumos	Caldera 1 800 BHP	Caldera 2 650 BHP	Caldera 3 200 BHP
Combustible (gal/h)	210.00	185.00	58.00
Horas de operación/año	253.00	6,932.00	3,306.00
Factor de emisión kg CO₂/litro de combustible	1.611	1.611	1.611
Ton de CO₂ al año	324.00	7,820.56	1,169.33

4. Interpretar los resultados: El cálculo de la huella de carbono para el sistema de calderas en una industria cervecera se realizó considerando dos escenarios: uno en el que se utiliza Bunker N° 6 como combustible, y otro en el que se emplea gas licuado propano (GLP). A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos:

a. **Emisiones utilizando Bunker N° 6 (o Fuel Oil):**

Total de emisiones: 17,928.23 toneladas de CO₂ por año.

b. **Emisiones utilizando gas propano (LPG):**

Total de emisiones: 9,313.89 toneladas de CO₂ por año.

13.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Al realizar el cambio de Fuel Oil a Gas propano como combustible del sistema de calderas en estudio logramos tener la siguiente comparativa:

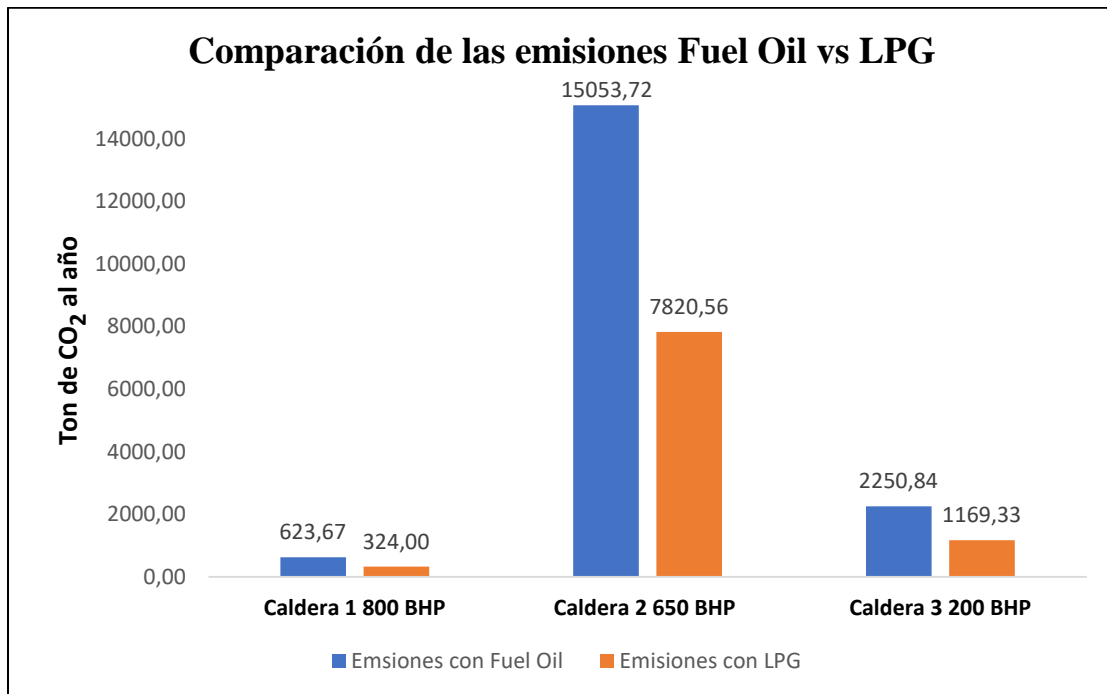


Gráfico 13.2. Comparación de las emisiones de CO₂ para cada caldera con el cambio de combustible.

El porcentaje de reducción de las emisiones de CO₂ es:

$$\% \text{ reducción de emisiones } CO_2 = \frac{\text{Emisiones Fuel Oil} - \text{Emisiones GLP}}{\text{Emisiones Fuel Oil}} \times 100$$

$$\% \text{ reducción de emisiones } CO_2 = \frac{17,928.2264 - 9,313.8899}{17,928.2264} \times 100$$

$$\% \text{ reducción de emisiones } CO_2 = 48.05\%$$

El ahorro en las emisiones de Dióxido de Carbono se representa de forma visual en la siguiente gráfica según las toneladas de CO₂ que se ha evitado soltar a la atmósfera:

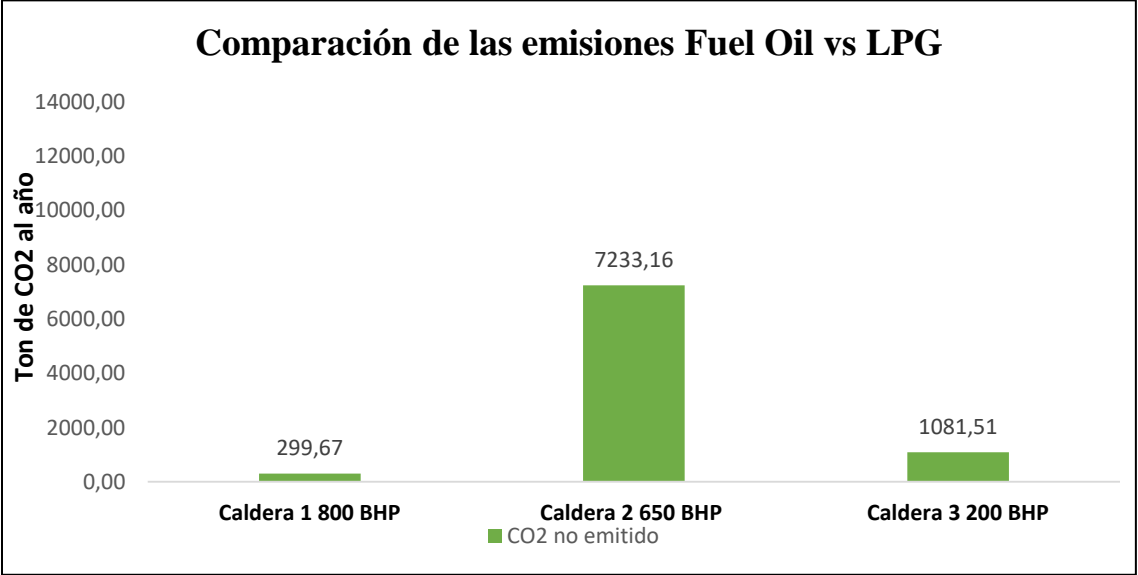


Gráfico 13.3. Comparación de las emisiones de CO₂ no emitidas a la atmósfera por el cambio de Fuel Oil a Gas Propano.

El cambio del combustible Bunker N° 6 al gas propano en el sistema de calderas presenta beneficios ambientales. La reducción del 48.05% en las emisiones de CO₂ demuestra que la adopción de un combustible más limpio como el gas propano no solo reduce la huella de carbono, sino que también contribuye a la sostenibilidad de la operación industrial.

Sin embargo, es importante considerar las implicaciones económicas y logísticas del cambio de combustible. La inversión en nuevas infraestructuras, ajustes en la operación y el costo del gas propano en comparación con el Bunker N° 6 deben ser evaluados cuidadosamente por la empresa cervecera.

El análisis demuestra que la sustitución del Bunker N° 6 por gas propano en el sistema de calderas de la industria cervecera resulta en una reducción considerable de la huella de

carbono, lo que es favorable desde una perspectiva ambiental. A pesar de los beneficios, es esencial llevar a cabo un análisis integral que contemple los aspectos económicos, operativos y logísticos antes de proceder con el cambio de combustible. El compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero debe ser balanceado con la viabilidad técnica y económica para asegurar una transición efectiva hacia prácticas más sostenibles.

14. REGISTRO DE INDICADORES DE ENERGÍA TÉRMICA

1. *Identificación de los indicadores relevantes:* El indicador que se medirá es el control de energía térmica de cerveza consumido mensualmente, medido en (MJ de vapor consumidos/hL de cerveza envasado).

2. *Selección del método de medición y sistema de registro.*

La empresa proporcionó los registros de sus indicadores. El principal indicador es el KPI de energía térmica, medido en MJ de energía (vapor) entre el cociente de hL envasados de forma mensual. A continuación, se presentan las gráficas con el desglose del acumulado mensual y el indicador acumulado anual:

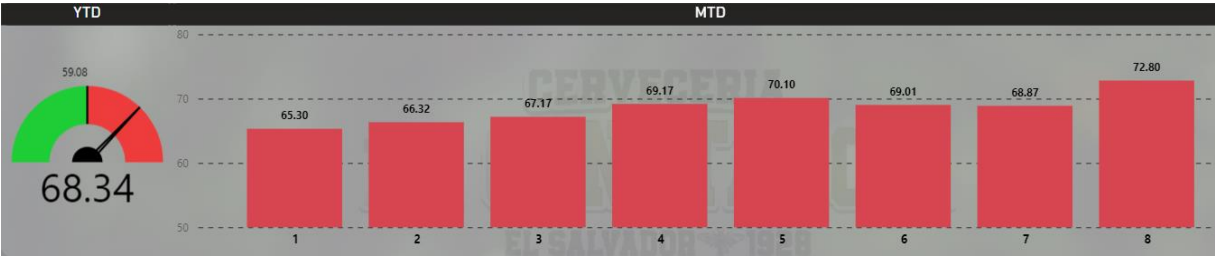


Figura 14.1. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado de la planta dividido por mes para el año 2024

Ahora se presentará el acumulado MTD (month to day) y YTD (year to day) de cada área donde se ocupa vapor en la planta:

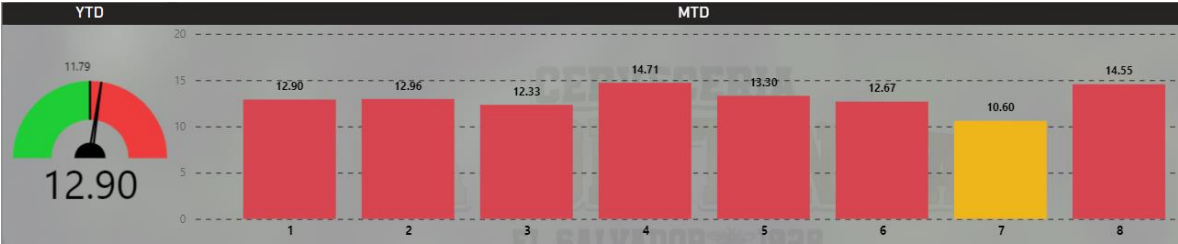


Figura 14.2. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado del departamento de Suministros dividido por mes para el año 2024

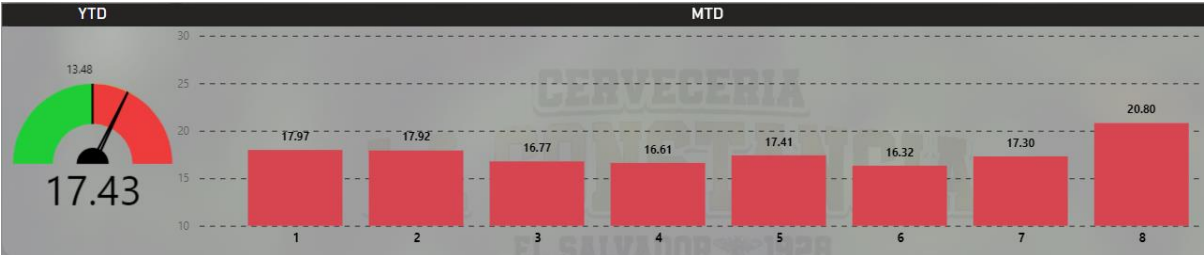


Figura 14.3. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado del departamento de Elaboración dividido por mes para el año 2024

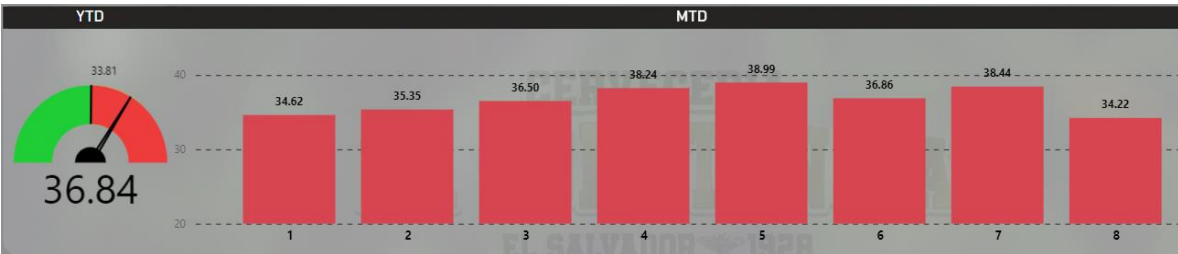


Figura 14.4. Indicador de Energía Térmica en MJ/hL envasado de Envasado dividido por mes para el año 2024

3. *Análisis de los datos registrados*

Revisión de los Indicadores Clave

- Consumo de Vapor (MJ/hL): Este indicador mide la cantidad de energía térmica en forma de vapor utilizada por cada hectolitro de producto envasado o producido.
- MTD (Month to Date): Acumulado mensual del consumo de vapor.
- YTD (Year to Date): Acumulado anual del consumo de vapor.

El análisis de estos datos debe centrarse en identificar tendencias, variaciones estacionales y discrepancias en el consumo de energía térmica.

Comparación con Puntos de Referencia

- **Zona Verde:** Representa la meta de consumo óptimo, donde el uso de vapor es eficiente y está dentro de los límites establecidos por las políticas de sostenibilidad de la empresa.
- **Zona Roja:** Señala un consumo excesivo de vapor, que requiere acciones correctivas inmediatas.

Identificación de Áreas Críticas

Las áreas que consumen más energía térmica deben ser identificadas y analizadas en detalle. Esto incluye:

- Suministros: Área que maneja el vapor para toda la planta, refrigeración almacenamiento del CO₂ proveniente de la fermentación alcohólica.
- Elaboración: Proceso de producción de cerveza.
- Envasado: Fase final del proceso de producción.

El análisis debe enfocarse en detectar ineficiencias en cada una de estas áreas, como fugas de vapor, sobrecalentamiento, o equipos mal calibrados.

4. *Establecimiento de metas y objetivos:*

Objetivos Generales

- **Reducción del Consumo Energético:** Disminuir el consumo de MJ de vapor por hL.
- **Mejora de la Eficiencia:** Aumentar la eficiencia energética en cada área, especialmente en las zonas críticas identificadas durante el análisis.
- **Cumplimiento de Normativas Ambientales:** Asegurar que el consumo de energía térmica esté alineado con las regulaciones ambientales y las metas de sostenibilidad corporativa.

Metas Específicas

- **Corto Plazo (6 meses):**
 - Implementar medidas correctivas en áreas críticas.
 - Mejorar el mantenimiento de equipos para evitar fugas de vapor.
- **Mediano Plazo (1-2 años):**
 - Invertir en tecnologías más eficientes para la generación y distribución de vapor.
 - Capacitar al personal en prácticas de ahorro energético.
- **Largo Plazo (3-5 años):**
 - Alcanzar la zona de bajo consumo en al menos el 80% de las operaciones idealmente.
 - Integrar el uso de energías renovables en el suministro de vapor.
 - Lograr una reducción del 20% en el consumo total de vapor por hL envasado idealmente.

Estrategias para el Cumplimiento de Metas

- **Monitoreo Continuo:** Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real para el consumo de vapor en cada área.
- **Optimización de Procesos:** Revisar y optimizar los procesos de producción y envasado para mejorar la eficiencia en el uso del vapor.

- **Innovación Tecnológica:** Adoptar tecnologías avanzadas que permitan un mejor control y distribución del vapor, como sistemas de cogeneración o calderas de alta eficiencia.
- **Capacitación y Conciencia:** Realizar campañas de sensibilización y capacitaciones para el personal, enfocadas en la importancia del ahorro energético y las prácticas sostenibles.

15. EVALUACIÓN ECONÓMICA

- Tipo de Evaluación Económica: EVALUACIÓN ECONÓMICA SIN FINANCIAMIENTO.

- Consideraciones para la evaluación:
 - Los datos de % de ahorro de combustible y PSRI de las estrategias en estudio son tomados de la Guía De Buenas Prácticas En Eficiencia Energética Para Sistemas De Vapor (USAID).
 - Se seleccionan aquellas medidas que NO han sido aplicadas en la empresa y que pueden poseer una mayor viabilidad de instalación.
 - Se considera una vida útil de 10 años para todas las medidas a implementar.
 - Se evalúa un horizonte de proyecto de 5 años.
 - Los galones de combustible Fuel Oil anuales consumidos se estiman en 925,000 gal/año.
 - El precio de Fuel Oil por galón a la fecha (oct 24) es de \$2.13/gal.
 - Se estima un costo operativo del 5% en función de la inversión inicial aproximada de cada estrategia.

La Tasa Mínima Atractiva de Rendimiento (TMAR) se calcula con la siguiente formula:

$$\text{TMAR} = \text{Inflación Promedio} + \text{Premio al Riesgo} + (\text{Inflación} \times \text{Premio al Riesgo})$$

El Banco Central de Reserva estima que la inflación de El Salvador cerrará entre 1% y 1.5% en 2024, por lo que se toma una inflación promedio de 1.3% y se considera un premio al riesgo del 10%.

Por lo que, al evaluar estos datos, se obtiene:

$$\text{TMAR} = 1.3\% + 10\% + (1.3\% \times 10\%)$$

$$\text{TMAR} = 11.43\%$$

Tabla 15.1. Ahorro, inversión y costos operativos de estrategias

ESTRATEGIA DE ECOEFICIENCIA (USAID, 2011)	%AHORRO DE COMBUSTIBLE	PSRI (AÑOS)	GALONES AHORRADOS DE COMBUSTIBLE POR AÑO	AHORRO ECONÓMICO EN COMBUSTIBLE \$/AÑO	INVERSIÓN INICIAL APROXIMADA	COSTO OPERATIVO ANUAL ESTIMADO
Ajuste de la relación aire combustible, tendiente a valores estequiométricos, en función del tipo de combustible y de las condiciones operativas del sistema de combustión	3.32	0.5	30,710	\$ 65,412.30	\$ 32,706.15	\$ 1,635.31
Aprovechar el calor de los gases de la chimenea para calentar algún Ácido útil, evitando la formación de ácido sulfhídrico	4.06	2.5	37,555	\$ 79,992.15	\$ 199,980.38	\$ 9,999.02
Reemplazar la caldera actual de baja eficiencia, por una caldera nueva más eficiente	2.06	2.5	19,055	\$ 40,587.15	\$ 101,467.88	\$ 5,073.39
Instalar acumulador de vapor	1.01	5.2	9,342.5	\$ 19,899.53	\$ 103,477.53	\$ 5,173.88
Cambio de combustible	9.6	0	88,800	\$ 189,144.00	\$ -	\$ -
TOTALES			185,463	\$ 395,035.13	\$ 437,631.93	\$ 21,881.60

Tabla 15.2. Cálculo de depreciación anual

VIDA UTIL (AÑOS)	10	
ESTRATEGIA DE ECOEFICIENCIA (USAID, 2011)	INVERSION INICIAL APROXIMADA	DEPRECIACION ANUAL
Ajuste de la relación aire combustible, tendiente a valores estequiométricos, en función del tipo de combustible y de las condiciones operativas del sistema de combustión	\$ 32,706.15	\$ 3,270.62
Aprovechar el calor de los gases de la chimenea para calentar algún Ácido útil, evitando la formación de ácido sulfhídrico	\$ 199,980.38	\$ 19,998.04
Reemplazar la caldera actual de baja eficiencia, por una caldera nueva más eficiente	\$ 101,467.88	\$ 10,146.79
Instalar acumulador de vapor	\$ 103,477.53	\$ 10,347.75
Cambio de combustible	\$ -	\$ -
	\$ 437,631.93	\$ 43,763.19

Tabla 15.3. Flujo de efectivo para evaluación económica sin financiamiento

Concepto/año	0	1	2	3	4	5
Ahorros		\$ 395,035.13	\$ 395,035.13	\$ 395,035.13	\$ 395,035.13	\$ 395,035.13
Costos		\$ 21,881.60	\$ 21,881.60	\$ 21,881.60	\$ 21,881.60	\$ 21,881.60
Flujo de caja operativo antes de impuestos y depreciación		\$ 373,153.53	\$ 373,153.53	\$ 373,153.53	\$ 373,153.53	\$ 373,153.53
Depreciación		\$ 43,763.19	\$ 43,763.19	\$ 43,763.19	\$ 43,763.19	\$ 43,763.19
Intereses (SIN FINANCIAMIENTO)		0%	0%	0%	0%	0%
Utilidad Bruta		\$ 329,390.34	\$ 329,390.34	\$ 329,390.34	\$ 329,390.34	\$ 329,390.34
ISR (30%)		\$ 98,817.10	\$ 98,817.10	\$ 98,817.10	\$ 98,817.10	\$ 98,817.10
Utilidad Neta		\$ 230,573.23	\$ 230,573.23	\$ 230,573.23	\$ 230,573.23	\$ 230,573.23
Amortización (NO HAY AMORTIZACION)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Depreciación		\$ 43,763.19	\$ 43,763.19	\$ 43,763.19	\$ 43,763.19	\$ 43,763.19
Valor de Rescate		0.00	0.00	0.00	0.00	218815.97
Flujo de Caja Neto	-\$ 437,631.93	\$ 274,336.43	\$ 274,336.43	\$ 274,336.43	\$ 274,336.43	\$ 493,152.39

Tabla 15.4. Resultados de evaluación económica

TMAR	11.43%
VAN	\$692,785.03
TIR	59%
PSRI (AÑOS)	1.11

Según los resultados obtenidos, para las condiciones descritas, la implementación de las medidas es económicamente factible.

15.1. Ahorro proyectado con las medidas implementadas

En el próximo año 2025 la empresa tiene planeado migrar de combustible Fuel Oil (Bunker No. 6) a Gas Propano, como una de las medidas para reducir la huella de Carbono. Sin embargo, a continuación, plantearemos un ahorro proyectado sin considerar el cambio del combustible, por la razón de no contar con datos reales sobre el precio y consumo del mismo, únicamente incluiremos las medidas propuestas anteriormente como el ajuste de la relación aire-combustible, aprovechar el calor de los gases de chimenea, reemplazar la caldera de baja eficiencia (800 BHP) e instalar un acumulador de vapor.

Para los cálculos próximos utilizaremos de base que el consumo anual del combustible Fuel Oil es de 1, 527,298 galones para todo el sistema de calderas, lo que equivale a \$ 3, 253,144.74 y, que además el porcentaje de ahorro en el consumo de combustible y el ahorro económico se calcularán por medio de una fórmula teórica, con valores aproximados.

Tomando como base 1 año de operación el ahorro proyectado es el siguiente:

Tabla 15.5. Resumen del ahorro proyectado

Medida implementada (USAID, 2011)	Galones ahorrados de combustible	TON CO₂ ahorradas	\$ ahorrados al año
Ajuste relación aire-combustible	50,706.29	595.06	108,004.41
Aprovechamiento de los gases de chimenea	62,008.30	727.65	132,077.68
Reemplazo de la caldera 800 BHP	31,462.34	369.20	67,014.78
Instalación de un acumulador de vapor	16,800.28	197.15	35,784.59
Consumo actual de combustible	1,527,298	17,928.23	3,253,144.74

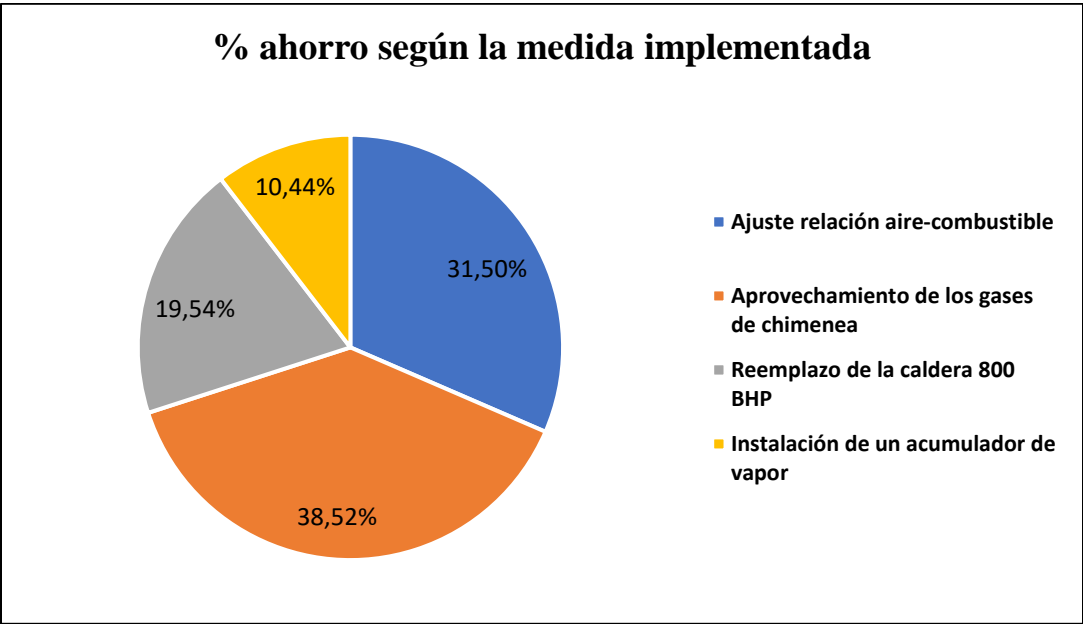


Gráfico 15.1. Porcentaje de ahorro según la medida implementada en base al total ahorrado.

16. EVALUACIÓN AMBIENTAL

La operación de las calderas, que generan vapor a partir de combustibles fósiles, puede conllevar ineficiencias que incrementan el consumo de combustibles, provocando mayores emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de azufre (SO₂). Se hará una evaluación de las estrategias de ecoeficiencia que no son implementadas por la empresa, especificando el ahorro que estas le darían a la empresa.

1. Ajuste de la relación aire-combustible, tendiente a valores estequiométricos, en función del tipo de combustible y de las condiciones operativas del sistema de combustión.

Ahorro: Un mínimo de 0.33% hasta un máximo de 20% respecto al consumo de combustible de la caldera, teniendo en promedio un ahorro de la energía utilizada en vapor verificable del 3.32%. El costo de implementación tiene un periodo simple de recuperación de la inversión de 0.5 años en promedio hasta un máximo de 3.3 años.

Medida/actividad	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
Ajuste de la relación aire-combustible, tendiente a valores estequiométricos	<ul style="list-style-type: none">- Disminución del exceso de aire en la combustión.- Menor uso de combustible.- Menor infiltración de aire en la caldera.	<ul style="list-style-type: none">- Maximización de la eficiencia térmica de la combustión, al no llevar gases no reactivos que absorben calor sin generar vapor útil.- Reducción del consumo de energía.- Menor cantidad de gases de escape (disminuyendo las emisiones de gases contaminantes).

2. Aprovechar el calor de los gases de la chimenea para calentar algún fluido útil, evitando la formación de ácido sulfhídrico.

Ahorro: Un mínimo de 1.84% hasta un máximo de 8.8% respecto al consumo de combustible, teniendo en promedio un ahorro de combustible del 4.06%. El costo de implementación tiene un periodo simple de recuperación de la inversión de 2.5 años en promedio hasta un máximo de 5.4 años.

Medida /actividad	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
Aprovechamiento del calor residual de los gases de la chimenea	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor eficiencia energética del sistema. - Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ y NO_x). - Evitar formación de ácido sulfhídrico en los gases de combustión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción en el consumo de recursos energéticos - Disminución en la huella de carbono

3. Reemplazar la caldera actual de baja eficiencia, por una caldera nueva más eficiente.

Ahorro: Su beneficio energético mínimo es de 2.06% hasta un máximo de 2.1 % respecto al consumo de combustible, teniendo en promedio un ahorro de combustible del 2.06%. El costo de implementación tiene un periodo simple de recuperación de la inversión de 2.5 años en promedio.

Medida / actividad	Aspectos	Impactos
Reemplazar la caldera actual de baja eficiencia, por una caldera nueva más eficiente	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de una caldera más nueva y de alta eficiencia. - Reemplazo de la caldera por una más eficiente. - Mejor control en la combustión y regulación de la nueva caldera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor consumo de combustible y energía. - Menor cantidad de gases de efecto invernadero emitidos. - Minimización de las pérdidas de calor.

4. Instalar acumulador de vapor.

Ahorro: Su beneficio energético promedio es de 1.01% respecto al consumo de combustible, El costo de implementación tiene un periodo simple de recuperación de la inversión de 5.2 años en promedio.

Medida/actividad	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
Instalación de un acumulador de vapor (almacenar vapor durante los periodos de baja demanda)	<ul style="list-style-type: none"> - Optimización de la distribución y el uso de vapor. - Reducción de la fluctuación de la presión en el sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución en consumo de recursos energéticos

5. Cambio de Combustible de Fuel Oil a Gas Licuado Propano (GLP)

Medida/actividad	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
Cambio de combustible	Generación de emisiones a la atmósfera	-Contaminación del aire -Agotamiento de recurso no renovable

CONCLUSIONES

- Se identifican y se evalúan estrategias específicas de ecoeficiencia para sistemas de generación de vapor que permitan un mejor aprovechamiento energético en las calderas pirotubulares de la empresa en estudio; si bien se consideraron varias propuestas y tomando en cuenta que la misma organización ya aplicaba parte de estas; la estrategia de ecoeficiencia más favorable para su respectiva implementación es el ajuste de la relación de aire-combustible con una tendencia a valores estequiométricos en función de las condiciones operativas del sistema de combustión. Al implementar dicha medida se puede alcanzar un ahorro económico en combustible actual (Bunker) de más de \$65,000 anuales.
- Del diagnóstico de la condición actual del sistema de calderas se concluye que la empresa posee un sistema de calderas que opera de manera efectiva, con una eficiencia de combustión superior al 85% en las unidades analizadas. Se identifican oportunidades de mejora en la relación entre el exceso de aire y el combustible, lo cual podría optimizar aún más la combustión.
- A través de un balance de materia y energía se llega a la conclusión de que la caldera 800 BHP es la menos eficiente, mostrando mayores pérdidas indeterminadas, lo cual es coherente con el hecho de ser la caldera más antigua y que en su operación genera la mayor cantidad de hollín. En contraste, la caldera de 200 BHP presenta un rendimiento superior tanto de forma teórica como en el análisis de combustión, lo cual se debe a las mejoras de ecoeficiencia ya implementadas.
- Por medio de una evaluación económica de las estrategias seleccionadas para considerar su viabilidad se muestra una Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) de 11.43%, un Valor Actual Neto (VAN) de \$692,785.03 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 59%, indicando que su implementación es viable a largo plazo.
- Del análisis del impacto ambiental se concluye que, las medidas de ecoeficiencia ya implementadas por la empresa contribuyen a la reducción del consumo energético y de emisiones de CO₂, aunque aún existe margen para mejoras adicionales, especialmente en la eliminación de fugas de vapor y el aislamiento térmico.

- Por medio del cálculo de la huella de carbono en la empresa, se llega a la conclusión de que el uso de Bunker No. 6 es la principal fuente de emisiones de CO₂ del sistema de calderas, subrayando la importancia de considerar un cambio hacia combustibles más limpios, como el gas propano, para lograr una reducción de hasta el 48.05% en la huella de carbono.

RECOMENDACIONES

- Para una mejor optimización del sistema de combustión se recomienda implementar un ajuste de relación de aire-combustible en las 3 calderas, reduciendo el exceso de aire a niveles mínimos factibles para aprovechar la energía que proveída por el combustible de una manera óptima. Para el combustible (Fuel Oil) se recomienda utilizar un exceso de aire entre 10 y 15% y para gas propano entre 5 y 10%; para lo cual es necesario realizar un análisis en los gases de combustión de cada caldera para determinar los valores de exceso de aire en regímenes de trabajo de las mismas.
- En cuanto a las mejoras en el retorno de condensado, se sugiere llevar a cabo un diagnóstico exhaustivo del sistema de retorno de condensado para maximizar su eficiencia y reducir el consumo de agua y energía térmica.
- Se le recomienda a la empresa la reparación y optimización de equipos, además de cumplir y apegarse al plan de mantenimiento, en la medida de lo posible actualizar los planes de mantenimiento de acuerdo a la demanda que se tiene actualmente, ya que de no cumplirlo se podría reducir el rendimiento de estas, emitir más gases contaminantes a la atmósfera, reducir la vida útil de las calderas, generar accidentes, aumentar los costos operativos y llevar a multas por el incumplimiento del mantenimiento regular. También se recomienda reparar los economizadores que se encuentran en mal estado y optimizar el trampeo de vapor, lo que incrementará la eficiencia energética y reducirá los costos operativos.
- Se recomienda reconsiderar el remplazo de la caldera de 800 BHP de año 1973 (la de menor eficiencia) por una caldera más actual, que soporte mayor carga y otorgue un mayor rendimiento, puesto que a largo plazo induciría una mejora en el proceso de generación de vapor a nivel general.
- Como medida ya considerada por la empresa, se le recomienda también en este estudio la transición a combustibles más limpios. Se debe considerar un plan para el cambio de combustible de Bunker a gas propano, lo que no solo disminuirá las emisiones de CO₂, sino que también reducirá otros contaminantes asociados a la combustión, permitiendo además el aprovechamiento de los gases de combustión.

- Como parte de la mejora continua, se sugiere el fortalecimiento de estrategias de ecoeficiencia aplicadas en la empresa, continuar evaluando y mejorando las prácticas de ecoeficiencia, enfocándose en la eliminación de fugas de vapor y el aislamiento térmico para maximizar la eficiencia del sistema de calderas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chemonics International, CysTE, USAID (2011). Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor. Estados Unidos.
- Consejo Nacional de Energía (2011). Metodología de Eficiencia Energética en la Industria. Dirección de Eficiencia Energética. Ministerio de Economía de la Republica de El Salvador.
- Reglamento Técnico Salvadoreño. Emisiones Atmosféricas, Fuentes Fijas Puntuales (RTS 13.11.02:13). Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica,
- Lapidó Rodríguez, M. J. Vidal Moya, D. A. & Madrigal Monzón, J. A. (2015). Funcionamiento y pérdidas en calderas pirotubulares: estudios de casos: (ed.). Editorial Universo Sur. <https://elibro.net/es/lc/biblioues/titulos/171685>.
- E. L. M., & C. P. V. (2022). Partes de una Caldera. Componentes y Elementos Principales: Euroair. Recuperado de <https://www.euroair.es/blog/partes-de-una-caldera>.
- Barrera Puigdollers, C., Betoret Valls, N., Castelló Gómez, M., Pérez Esteve, E. (2018). Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera.
- Kuppan, T. (2017). Transferencia de Calor y Resistencia Hidráulica a Presiones Supercríticas en Aplicaciones de Ingeniería de Energía.
- Vega, S., Arze, C., Botello, M., Demillón, R., Lino, M., Sánchez, I., Torres, R. (2011, junio). Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2011). Metodología de Eficiencia Energética en la Industria.
- Briggs, D., Boulton, C., Brookes, P., Stevens, R. (2004). Elaboración de cerveza: Ciencia y Práctica.
- Consejo Nacional de Energía (2014). Inventario y caracterización de calderas en El Salvador.
- Instituto Meteorológico Nacional (2016). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Costa Rica.

- Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A., & Stevens, R. (2004). *Elaboración de cerveza: Ciencia y práctica*.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (11 de diciembre de 2024). *Evaluación del sistema de generación y distribución de vapor de una empresa cárnica*. https://www.redalyc.org/journal/849/84966670010/html/#redalyc_84966670010_ref2
- Arjona Aguado, A. (2019) *Revisión de métodos para la determinación de pérdidas y eficiencia energética en generadores de vapor* [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71396/fichero/TFM-1396-ARJONA.pdf>
- Tablas de vapor saturado, líquido subenfriado y vapor sobrecalentado de la IAPWS (2007) *International Association for the Properties of Water and Steam*.
- Ferreyra, L. (2014) *Elaboración de cerveza: Historia y evolución, desarrollo de actividades de capacitación e implementación de mejoras tecnológicas para productores artesanales*. [Tesis de maestría, Universidad de la Plata]. <https://lipa.agro.unlp.edu.ar/wp-content/uploads/sites/29/2020/03/Trabajo-Final-Leonel-Ferreyra-.pdf>
- Gil Acevedo, E. (2023) *Análisis del Costo del Ciclo de Vida a una Caldera Piro-tubular en empresa caso de estudio sector de Biocombustible*. [Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales]. <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/3280/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

ANEXOS

ANEXO I. Cumplimiento de mantenimiento de caldera 800 BHP desde enero 2021-agosto 2024

CALDERA 800 BHP	N° veces realizado
Ajuste Menor Caldera (Semanalmente)	55
Análisis Gases De Combustión Caldera (Quincenalmente)	122
Automatización-Limpieza Quincenal Caldera	7
Automatización-Limpieza Semanal Caldera	13
Certificación Externa en Caliente Caldera (6 Veces Al Mes)	5
Certificación Externa en Frio Caldera (anualmente)	1
Inspección Interna de Armario Eléctrico (3 veces al mes)	2
Inspección Panel Control/Fuerza Caldera (anualmente)	2
Inspección Calentadores Eléctricos Caldera (3 veces al mes)	9
Inspección Dispositivos De Medición Caldera (anualmente)	2
Inspección Quemador Caldera (3 veces al mes)	10
Inspección Válvulas Seguridad Caldera (3 veces al mes)	9
Inspección Diaria Caldera	55
Integridad Mecánica Caldera (anualmente)	2
Limpieza Armarios Eléctricos Caldera (4 veces al mes)	10
Limpieza Mensual Caldera	25
Limpieza Quincenal Caldera	43
Limpieza Semanal Caldera	92
Mantenimiento Válvula Reguladora Agua Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Bomba Combustible Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Control Nivel de Agua Caldera (anualmente)	2

Mantenimiento Controles de Presión Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Cuerpo Caldera (anualmente)	3
Mantenimiento Economizador Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Motor Ventilador Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Precalentador Vapor-Combinado Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Aire-Atomización Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Vapor-Atomización Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Ignición Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Modulación Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Válvulas Seguridad Caldera (anualmente)	3
Mantenimiento Calentadores Eléctricos Caldera (anualmente)	2
Prueba Funcionamiento Presión Emergida Caldera (mensualmente)	6

ANEXO II. Cumplimiento de mantenimiento de caldera 650 BHP desde enero 2021-agosto 2024

CALDERA 650 BHP	N° veces realizado
Ajuste Menor Caldera (Semanalmente)	71
Análisis Gases de Combustión Caldera (quincenalmente)	142
Limpieza Automática Quincenal Caldera	6
Limpieza Automática Semanal Caldera	13
Certificación Externa en Caliente Caldera (6 veces al mes)	7
Certificación Externa en Frio Caldera (anualmente)	2
Inspección Ultrasonido Trampas Caldera (3 veces al mes)	1
Inspección Panel Control/Fuerza Caldera (anualmente)	2
Inspección Purgador Automático Caldera (4 veces al mes)	10

Inspección Calentadores Eléctricos Caldera (4 veces al mes)	8
Inspección Dispositivos De Medición Caldera (anualmente)	2
Inspección Quemador Caldera (4 veces al mes)	10
Inspección Válvulas Seguridad Caldera (4 veces al mes)	10
Inspección Diaria Caldera	72
Inspección Pantalla Mk8 (2 veces al mes)	3
Integridad Mecánica Caldera (anualmente)	3
Limpieza Armarios Eléctricos Caldera (4 veces al mes)	10
Limpieza Elementos Varios Caldera (mensualmente)	31
Limpieza Mensual Caldera	25
Limpieza Quincenal Caldera	44
Limpieza Semanal Caldera	93
Mantenimiento Precalentador Vapor-Combustión Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Purgador Automático Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Válvula Reguladora Agua Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Bomba Combustible Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Control Nivel Agua Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Controles De Presión Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Cuerpo Caldera (anualmente)	5
Mantenimiento Motor Ventilador Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Vapor-Atomización Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Aire-Atomización Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Ignición Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Modulación Caldera (anualmente)	3

Mantenimiento Válvulas Seguridad Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Calentadores Eléctricos Caldera (anualmente)	2
Prueba Funcionamiento Presión Emergida Caldera (mensualmente)	12

ANEXO III. Cumplimiento de mantenimiento de caldera 200 BHP desde enero 2021-agosto 2024

CALDERA 200 BHP	N° veces realizado
Ajuste Menor Caldera (semanalmente)	63
Análisis Gases de Combustión Caldera (quincenalmente)	133
Certificación Externa en Caliente Caldera (6 veces al mes)	6
Certificación Externa en Frio Caldera (anualmente)	2
Inspección Ultrasonido Trampas Caldera (3 veces al mes)	1
Inspección Panel Control/Fuerza Caldera (anualmente)	3
Inspección Purgador Automático Caldera (mensualmente)	9
Inspección Calentadores Eléctricos Caldera (3 veces al mes)	10
Inspección Dispositivos de Medición Caldera (anualmente)	2
Inspección Quemador Caldera (mensualmente)	19
Inspección Válvulas Seguridad Caldera (3 veces al mes)	10
Inspección Diaria Caldera	60
Integridad Mecánica Caldera (anualmente)	1
Limpieza Armarios Eléctricos Caldera (4 veces al mes)	10
Limpieza Mensual Caldera	25
Limpieza Quincenal Caldera	50
Limpieza Semanal Caldera	106
Mantenimiento Purgador Automático Caldera (anualmente)	2

Mantenimiento Válvula Reguladora Agua Caldera (anualmente)	3
Mantenimiento Bomba Combustible Caldera (anualmente)	3
Mantenimiento Control Nivel Agua Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Controles de Presión Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Cuerpo Caldera (anualmente)	6
Mantenimiento Motor Ventilador Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Motor Ventilador Caldera (anualmente)	1
Mantenimiento Precalentador Vapor-Combustible Caldera (anualmente)	3
Mantenimiento Sistema Vapor-Atomizador Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Aire-Atomización Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Ignición Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Sistema Modulación Caldera (anualmente)	2
Mantenimiento Válvulas Seguridad Caldera (anualmente)	3
Mantenimiento Calentadores Eléctricos Caldera (anualmente)	2
Prueba Funcionamiento Presión Emergida Caldera (mensualmente)	11