



UNIVERSIDAD
DE CIENFUEGOS

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO: Evaluación energética de la sala de calderas del Centro Especializado Ambulatorio (CEA).

Autor: Bernardo Lamas Torres

Tutores: Dr.C. Yarelis Valdivia Nodal

CIENFUEGOS, 2023

Declaración de autoridad.

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de **“Ingeniería Mecánica”**, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estimen convenientes, tanto de forma parcial como total y además no podrá ser presentado en evento, ni publicado sin la aprobación de la Facultad.

Firma del Autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor.

Firma del Tutor.



Pensamiento

'' Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad. ''

Albert Einstein.



Dedicatoria

A mi madre: A la mujer más valiente y amorosa que conozco, mi madre. Gracias por ser mi apoyo incondicional en cada paso de mi vida. Tu amor y dedicación me han inspirado a alcanzar mis metas. Esta tesis es un reflejo de tu infinito amor y sacrificio. Te amo, mamá.

A mi hermano: A mi hermano, mi confidente y compañero de aventuras. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome tu apoyo y alentándome en cada etapa de mi vida. Esta tesis también es tuya, porque cada logro mío es también tuyo. Gracias por ser mi mejor amigo, hermano.

A mis amigos: A mis amigos, quienes han sido mi fuerza y apoyo en los momentos más difíciles. Gracias por escucharme, animarme y motivarme a seguir adelante. Su amistad ha sido un regalo preciado y esta tesis es un testimonio de nuestra complicidad y compañerismo. Sin ustedes, esto no habría sido posible.

Dedicada a todas las personas que me ayudaron en mi tesis: A todas las personas que generosamente dedicaron su tiempo y conocimiento para ayudarme en esta tesis, les agradezco de corazón. Su apoyo y orientación han sido invaluable en este proceso. Gracias por creer en mí y por compartir su sabiduría. Esta tesis es el resultado de nuestro esfuerzo conjunto.

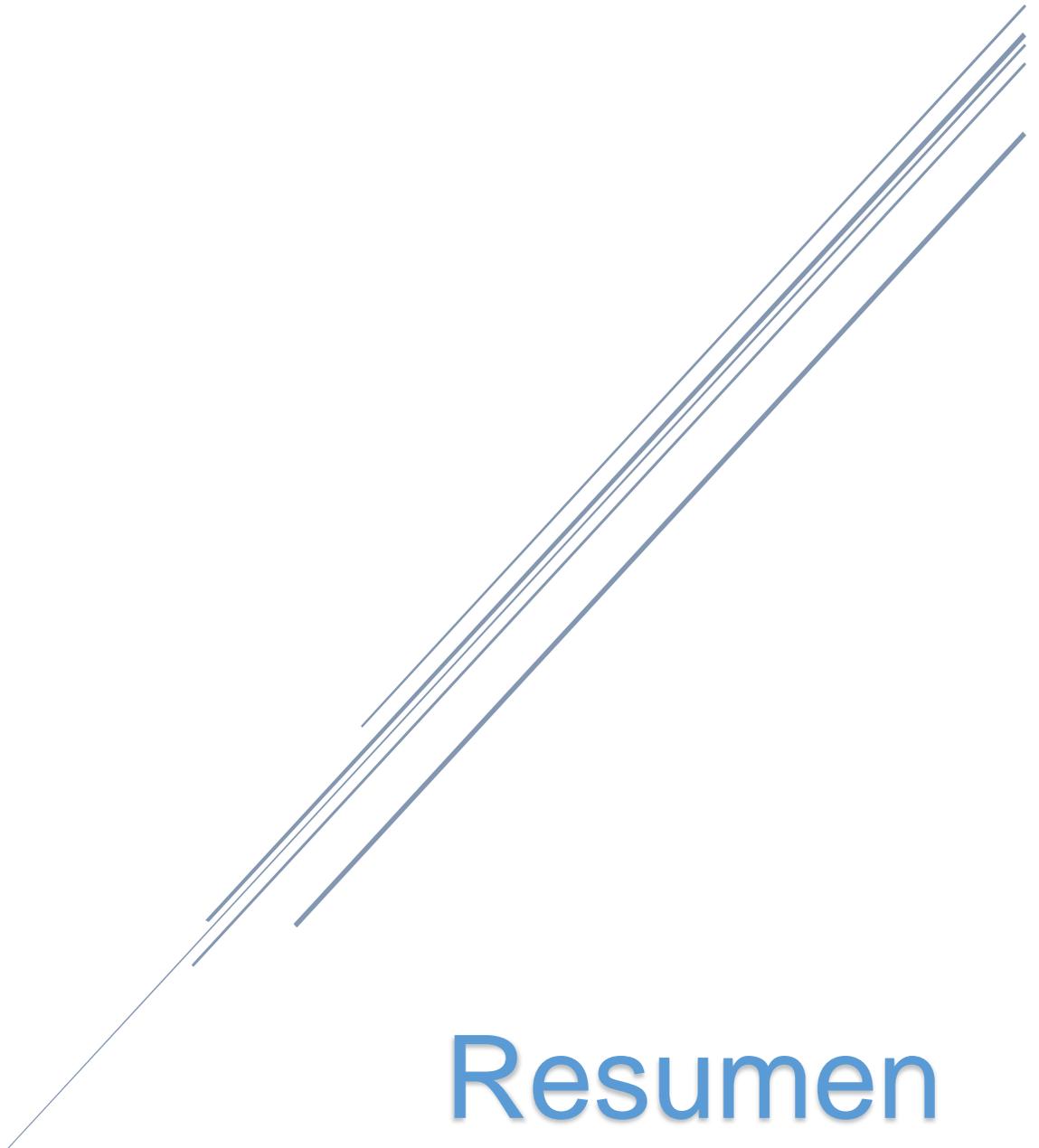
Quiero agradecer a mi novia por su ayuda y apoyo incondicional durante la realización de mi tesis. Su dedicación, conocimiento y comentarios constructivos han enriquecido mi trabajo y me han ayudado a mejorar. Además, su apoyo emocional y aliento constante han sido fundamentales para superar los momentos de estrés y duda. Estoy profundamente agradecido por tenerla a mi lado como mi compañera de vida y mi mayor admiradora.



Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en el éxito de mi tesis. Sin su valioso apoyo, orientación y motivación, este logro no habría sido posible. En primer lugar, quiero agradecer a mi tutora de tesis por su dedicación. Sus conocimientos y consejos fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Gracias por su paciencia y por brindarme la oportunidad de crecer académicamente. También quiero expresar mi gratitud a mis profesores, quienes me brindaron su enseñanza y sabiduría a lo largo de mi carrera. Sus lecciones y comentarios constructivos han sido fundamentales en mi formación como profesional. Agradezco a mis amigos y compañeros de estudio, quienes estuvieron a mi lado durante todo este proceso. Su apoyo moral y colaboración fueron un gran estímulo para seguir adelante. Gracias por ser mi red de contención y por compartir conmigo momentos de estudio y diversión. A mi familia, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento. Gracias a su amor incondicional, paciencia y comprensión, pude dedicar tiempo y esfuerzo a la realización de esta tesis. Su apoyo emocional y económico fue fundamentales para alcanzar este logro. Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a todas las personas que participaron en mi investigación y a quienes amablemente brindaron su tiempo y conocimientos para ayudarme en este proceso. Su colaboración ha sido invaluable y ha enriquecido mi trabajo de manera significativa. A todos y cada uno de ustedes, mi más sincero agradecimiento. Su apoyo ha sido un pilar fundamental en mi camino hacia la culminación de esta tesis. Estoy profundamente agradecido por su confianza, ánimo y contribución a mi desarrollo académico y profesional.

¡Gracias de todo corazón!

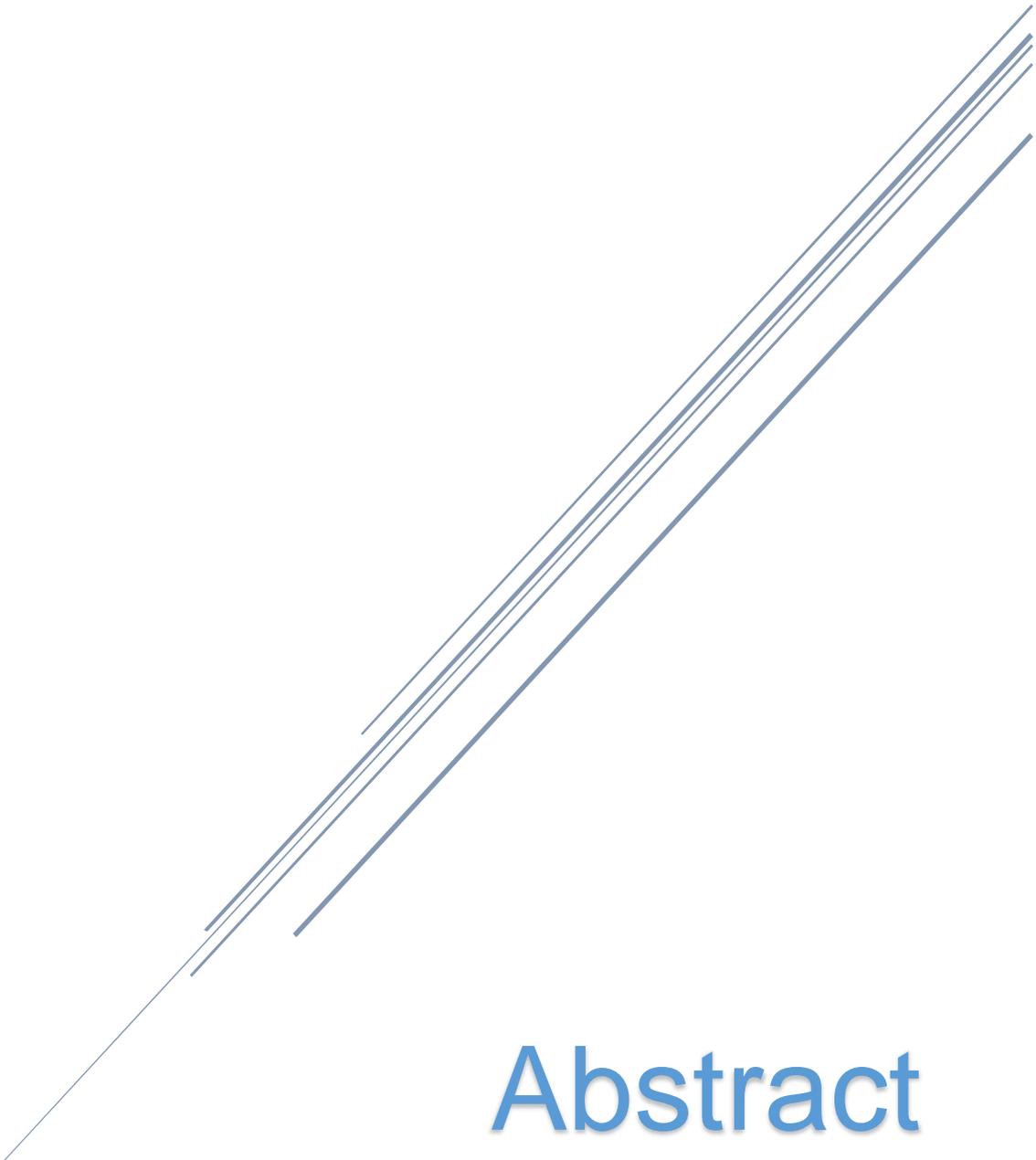


Resumen

Resumen

La tesis se enfoca en la evaluación del desempeño energético y las pérdidas térmicas asociadas al generador de vapor de la sala de calderas del Centro Especializado Ambulatorio (CEA) de Cienfuegos. El objetivo principal es aplicar un método ya existente para la evaluación de la eficiencia energética y el impacto ambiental de un generador de vapor pirotubular, que incluye la determinación de las pérdidas en la caldera y el uso de herramientas no invasivas como la cámara termográfica para determinar el perfil de temperatura superficial. La metodología utilizada puede ser aplicada a calderas de baja potencia y pirotubulares. Los resultados de este análisis permitieron realizar un diagnóstico para conocer desempeño energético actual de la instalación, bajo las condiciones de operación a las que está sometido. Se identificaron las principales pérdidas de calor por radiación, lo cual se corrobora con el uso de la termografía, y se proponen medidas de ahorro energético con el objetivo de hacer un uso más racional de los recursos energéticos, reducir consumos de combustibles, lo que conlleva a una disminución de los costos de la instalación. Se espera que los resultados obtenidos puedan ser utilizados por el centro hospitalario para proponer mejoras o reformas que incrementen la eficiencia energética.

Palabras claves: caldera pirotubular, eficiencia energética, generador de vapor, impacto ambiental, pérdidas térmicas, termografía.



Abstract

Abstract

The thesis focuses on the evaluation of the energy performance and thermal losses associated with the steam generator boiler room of the Specialized Outpatient Center (CEA) of Cienfuegos. The main objective is to apply an existing method for the evaluation of the energy efficiency and environmental impact of a fire-tube steam generator, which includes the determination of losses in the boiler and the use of non-invasive tools such as the thermographic camera to determine the surface temperature profile. The methodology used can be applied to low-power and fire-tube boilers. The results of this analysis allowed a diagnosis to be made to know the current energy performance of the installation, under the operating conditions to which it is subjected. The main heat losses due to radiation were identified, which is corroborated with the use of thermography, and energy saving measures are proposed with the aim of making a more rational use of energy resources, reducing fuel consumption, which reduction in installation costs. It is expected that the results obtained can be used by the hospital to propose improvements or reforms that increase energy efficiency.

Keywords: fire tube boiler, energy efficiency, steam generator, environmental impact, thermal losses, thermography.

Índice

Contenido	
Introducción.....	15
Capítulo I: Marco teórico	19
I.1. Definición de generador de vapor.	19
I.1.1. El agua como sustancia de trabajo.	20
I.1.2. ¿Cuáles son las razones del uso preferente del agua como fluido portador de calor?.....	21
I.1.3. Calderas pirotubulares: Componentes y principios de funcionamiento.	21
I.2. Generalidades del proceso de combustión.	24
I.4. Antecedentes sobre la aplicación de metodologías para determinar la eficiencia en calderas pirotubulares.	26
I.5. Estudios sobre las pérdidas térmicas en calderas pirotubulares.	27
I.6. Impacto ambiental en calderas pirotubulares.....	31
Capítulo II: Metodología para evaluar la eficiencia del generador de vapor del CEA.....	35
II.1. Descripción del sistema de generación de vapor.....	35
II.2. Combustible de trabajo.	37
II.3. Análisis del consumo de combustible en caldera: línea base energética.	37
II.4. Cálculo de la eficiencia energética.....	38
II.4.1. Determinación de la eficiencia por el método directo.....	38
II.4.2. Determinación de la eficiencia por el método indirecto.....	39
II.5. Análisis de las pérdidas por radiación con apoyo de la termografía.	43
II.6. Análisis de impacto ambiental.....	44
Capítulo III: Resultados de la evaluación e impacto ambiental.	47
III.2 Resultados de la eficiencia por el método directo.....	47
III.3. Resultados de la eficiencia por el método indirecto.	47

III.4. Análisis de las pérdidas por radiación con apoyo de la termografía.	48
III.5. Propuestas de mejoras de eficiencia energética.....	52
III.6. Evaluación del impacto ambiental.....	53
Conclusiones.....	55
Recomendaciones	57
Referencias bibliográficas	59
Anexos	63



Introducción

Introducción

Numerosos estudios plantean que la tendencia y necesidad para la atención médica en el presente, se enfoca en mejorar los servicios de salud y en disponer de servicios hospitalarios más especializados y menos costosos; por lo que la sala de calderas en un hospital es un componente crítico de las operaciones debido a su papel fundamental en la provisión de calor y agua caliente para el funcionamiento diario. Su importancia radica en varios aspectos: cocción de alimentos, agua caliente sanitaria, esterilización, entre otras. El funcionamiento de una sala de calderas en un hospital implica una serie de procesos y sistemas diseñados para garantizar un suministro constante de calor y agua caliente para las necesidades de la institución. Su correcto funcionamiento es crucial para el bienestar de los pacientes, la eficiencia del personal y el cumplimiento de los estándares de atención médica.

Hoy en día el generador de vapor es un elemento esencial en el funcionamiento prácticamente de todas las industrias por su fácil generación, manejo y efectividad. Los generadores de vapor modernos se fabrican en una amplia gama de tipos y capacidades. En Cuba y en el resto del mundo se estudian los nuevos diseños de generación de vapor que constituye un elemento esencial para explotar el campo industrial.

Se trabaja con una caldera pirotubular modelo CMS-C/440 que producen vapor para la industria desde hace más de 150 años. Es un generador de vapor convencional de tres pasos de humos y un solo hogar de combustión, diseñado para la utilización de combustibles líquidos. En la actualidad es muy utilizada en pequeñas empresas industriales y centros donde se requiera la generación de pequeñas cantidades de vapor. Constituye un sistema de superficies de calentamiento destinado a la producción de vapor a partir del agua de alimentación que se le suministra, mediante la utilización del calor liberado en la combustión de un combustible.

Se emplean en el trabajo diferentes metodologías para determinar la eficiencia de la caldera pirotubular del CEA, destacándose toda la literatura de los autores que analizaron objetivamente las posibles soluciones ante problemas similares

en cuanto a la eficiencia energética de otras calderas pirotubulares. Además, según estudios realizados se estima pérdidas de calor por radiaciones y se empleó para obtener como resultado la cámara termográfica, que es utilizada para analizar las temperaturas en diferentes zonas críticas de un generador de vapor del tipo pirotubular. Para el procesamiento de las imágenes termográficas se utilizó el Software IRISoft que permite el manejo de las imágenes a una escala visual con un alto contenido en la calidad de las representaciones, permitiendo también ajustes en la emisividad del material. El uso de la termografía contribuyó a mejorar la eficiencia del equipo permitiendo ser evaluada la caldera de manera más precisa.

No se puede obviar la protección del medio ambiente por ser estas calderas grandes contaminantes, ni tampoco se puede olvidar el alto impacto ambiental causado por las emisiones, aspecto que se extiende para diversas capacidades y tipo de combustibles en las 1837 calderas instaladas en el país. Se analizan los fallos que ocurren en las condiciones de explotación del servicio de salud y se proponen medidas para mitigar el impacto ambiental y restablecer el área afectada.

El mantenimiento y la supervisión regulares son fundamentales para garantizar que la sala de calderas funcione de manera eficiente, asegurando así un suministro confiable de calor y agua caliente para el hospital, al tiempo que se maximizan los ahorros de costos y se cumplen las regulaciones ambientales. Estas redes de servicios ambulatorios especializados, cumplen un valioso papel en el descongestionamiento de los grandes hospitales, permiten lograr mejor calidad de atención y satisfacción de la población, así como ampliar considerablemente la cobertura de salud.

Problema Científico

La necesidad de evaluar el desempeño energético y determinación de pérdidas térmicas del generador de vapor de la sala de calderas del Centro Especializado Ambulatorio, debido a que lleva más de 6 meses de operación continua.

Hipótesis

Con la aplicación de una metodología para la evaluación del desempeño energético del generador de vapor será posible conocer su eficiencia actual, así

como identificar las principales pérdidas térmicas y proponer medidas de ahorro de energía.

Objetivo General

Evaluar el desempeño energético y determinar las pérdidas térmicas asociadas al generador de vapor de la sala de calderas del Centro Especializado Ambulatorio.

Objetivos Específicos

1. Realizar la revisión de estado del arte sobre estudios de evaluación energética aplicado a sistemas de generación de vapor.
2. Aplicar una metodología de cálculo existente para la evaluación energética del generador de vapor en estudio.
3. Determinar las principales pérdidas térmicas y proponer medidas de ahorro energético.
4. Realizar análisis de impacto ambiental de la sala de calderas de la instalación objeto de estudio.



Capítulo 1

Capítulo I: Marco teórico

Introducción al capítulo I

La generación y utilización del vapor ha sido el pilar fundamental en el desarrollo de la humanidad, siendo la chispa que impulsó a la revolución industrial, momento, a partir del cual se produce el desarrollo acelerado de la industria moderna de procesos. Hoy en día el generador de vapor es un elemento esencial en el funcionamiento prácticamente de todas las industrias. No erróneamente es que se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna. (Rubio González. & Borroto Nordelo, 2007)

I.1. Definición de generador de vapor.

Diversos autores clasifican el término generador de vapor tomando como concepto el término intercambiador de calor y especificando sus diversos usos industriales. El término de generador de vapor está siendo utilizado en la actualidad para reemplazar la denominación de caldera. Es un intercambiador de calor altamente especializado, en el cual se transfiere al agua, el calor desprendido por el combustible, para formar el vapor. Lo componen diversos equipos con diferentes funciones, pero todos contribuyen a garantizar su funcionamiento y aumentar su eficiencia térmica (Rubio González. & Borroto Nordelo, 2007). El nombre de Generador de Vapor es mucho más reciente que estos equipos y ha sustituido al de caldera, como se conocían inicialmente. Se definen por muchos autores: instalaciones transformadoras de energía, donde se libera la energía contenida en los combustibles, mediante el proceso de combustión la que en su mayor parte se transfiere al agua, convirtiendo a esta en vapor con la calidad y los parámetros que fija el consumidor. El vapor de agua generado es uno de los medios de transmisión de calor de mayor efectividad y su fácil generación y manejo lo han situado como uno de los servicios auxiliares más difundidos en la industria. Los generadores de vapor modernos se fabrican en una amplia gama de tipos y capacidades, los hay desde pequeñas unidades con producciones de 0,3 t/h y presiones menores que 1Mpa, hasta gigantescas instalaciones de 4 000 t/h de producción y presiones del orden de los 26 MPa. En cuanto a la temperatura van desde simples unidades de vapor saturado, hasta generadores de vapor sobrecalentado a 570 °C. (Rubio González. & Borroto Nordelo, 2007)La compañía Babcock and Wilcox en su última edición

define al generador de vapor o caldera como el equipo que usa calor para convertir agua en vapor para diferentes aplicaciones, donde incluye los que generan potencia eléctrica y los que entregan procesos de calentamiento industrial, se plantea el vapor como un recurso de alta disponibilidad. Dada la diversidad de tipos, amplia gama de capacidades, y complejidad técnica, justifica la necesidad para su correcta explotación y el conocimiento de los procesos en las plantas que se explotan, garantizando su fiabilidad y eficiencia. Según (Rubio González. & Borroto Nordelo, 2007)) un aspecto importante que las empresas deben considerar es el conocimiento de las personas como un activo productivo y como tal, uno de los más importantes de que disponen, ya que la instalación sin el personal adecuadamente preparado para manejarlo, es factor de alto riesgo para la supervivencia empresarial, así disponga de la última tecnología. Por lo que se debe motivar a dar capacitación, entrenamiento y reentrenamiento a los trabajadores en todos los niveles: ingenieros, supervisores, técnicos y operadores. En Cuba, hoy en día los generadores constituyen un elemento esencial en el funcionamiento de todas las empresas industriales al proporcionar la potencia o el calor necesario para el proceso, dependiendo sus resultados productivos y económicos en gran medida de la confiabilidad, seguridad y eficiencia con que operen los generadores. Los cambios ocurridos en el mundo al seleccionar los nuevos diseños deben ser estudiados para la selección y explotación, incluyendo desde las propiedades del combustible, la explotación continúa sin obviar la protección ambiental en los procesos de combustión y en la eficiencia para reducir el CO₂ en las emisiones. (*B&W Steam - Its Generation and Use*, s. f.)

I.1.1. El agua como sustancia de trabajo.

Salvo en el caso en que el vapor se utiliza como materia prima para un proceso, en el resto de los casos el vapor actúa como un transportador de energía, trasladando una parte de la energía química liberada en la combustión del combustible desde el generador de vapor hasta los diferentes equipos de la instalación.

I.1.2. ¿Cuáles son las razones del uso preferente del agua como fluido portador de calor?

Básicamente las tres razones para que ocurra esto son:

1. La abundancia del agua
2. Su bajo costo.
3. Sus favorables propiedades, dentro de las que se pueden mencionar:
 - Alto calor específico
 - Alto calor latente
 - Relativamente baja viscosidad
 - Alto coeficiente pelicular de transferencia de calor
 - Alta temperatura de saturación a presiones relativamente bajas
 - Bajo consumo de potencia de bombeo
 - No es tóxica, ni inflamable, ni corrosiva

I.1.3. Calderas pirotubulares: Componentes y principios de funcionamiento.

Las calderas pirotubulares producen vapor para la industria desde hace más de 150 años. Los primeros generadores contruidos eran simples recipientes cilíndricos remachados y hermetizados con las correspondientes tuberías de suministro de agua y extracción de vapor, las cuales contaban con un calentamiento externo por su parte inferior a partir de la combustión de carbón o leña, acumulándose en la parte superior de este recipiente el vapor generado.

Con el tiempo se comprendió que, si se incrementaba la superficie de transferencia de calor, se incrementaría su generación. Esto se hizo colocando tubos dentro del recipiente, por los cuales circulaban los gases calientes; de esta forma se originó la caldera de tubos de fuego.

La construcción general de la caldera de tubos de fuego no es otra que un casco metálico de forma cilíndrica, en cuyos extremos se han colocado para su cierre, placas conocidas como espejos. Colocados dentro del cilindro y yendo de espejo a espejo están los tubos, los cuales se fijan mediante mandrilado o soldadura; por dentro de estos tubos circulan los gases calientes.

El desarrollo técnico trajo como consecuencia la necesidad de incrementar la presión de trabajo y alcanzar mayores capacidades, usando para su construcción materiales más resistentes como el acero.

La evolución de los generadores de tubos de fuego en sus inicios estuvo marcada por la tendencia hacia la disminución en el diámetro de los tubos de humo, buscando incrementar la velocidad de los gases y el área de transferencia de calor, haciendo la caldera más compacta. En sus inicios el fogón estaba colocado en la parte exterior de la caldera debajo de esta, de manera que la caldera recibía calor de la llama directa proveniente del fogón y los gases calientes mediante el uso de cámaras de inversión se hacían pasar a través de uno o varios pases convectivos. Posteriormente surgió el diseño con el fogón integrado dentro del casco, formado por un tubo cilíndrico y liso, soportado en los espejos de la caldera, denominado caldera escocesa.

La caldera de tubos de fuego que se ha impuesto y en la actualidad es muy utilizada en pequeñas empresas industriales y centros donde se requiera la generación de pequeñas cantidades de vapor. Esta caldera es construida de forma compacta, de tal manera que para su puesta en servicio sólo se requiere la construcción de una simple cimentación y su interconexión con el sistema.

Estos generadores tienen hoy su campo de aplicación en instalaciones de pequeña capacidad y presión, donde el vapor se utiliza como medio de calentamiento, debido a sus siguientes ventajas:

- Diseño simple y compacto.
- Construcción tipo paquete producidas en fábrica.
- Facilidades de montaje, instalación y operación.
- Bajo costo inicial.
- Aceptable eficiencia en su rango de aplicación.
- Corto período de tiempo para el suministro y puesta en marcha.

Partes principales de una caldera pirotubular, en la figura 1.1 se muestran sus principales componentes.

- **Quemador.**

Elemento de una caldera encargado de quemar el combustible.

- **Hogar o Cámara de Combustión**

Es la parte de la caldera donde se quema el combustible y se encuentran las temperaturas más altas.

- **El Circuito de Humos de una Caldera.**

Su característica principal es la de conducir los humos que producen en la combustión hacia la caja de humos.

- **Caja de Humo de una Caldera.**

Es la parte de la caldera donde confluyen los humos que después salen hacia el exterior por la chimenea.

- **Retorno de Agua de una Caldera.**

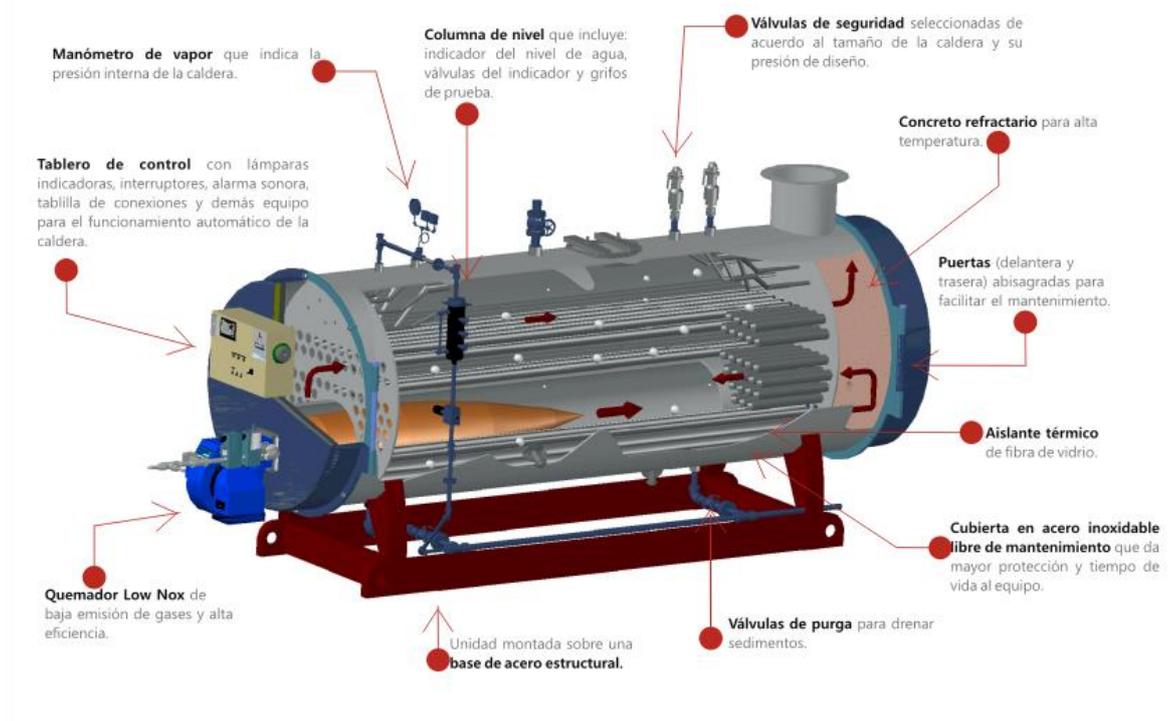
Es la toma por donde retorna el agua que viene de los radiadores o el acumulador.

- **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 de una Caldera.**

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.



En la **Fig. 1.1** se presenta una caldera piro-tubular con sus componentes principales extraída de (dice, 2020)

I.2. Generalidades del proceso de combustión.

Un generador de vapor convencional constituye un sistema de superficies de calentamiento destinado a la producción de vapor a partir del agua de alimentación que se le suministra, mediante la utilización del calor liberado en la combustión de un combustible, el cual se suministra al horno conjuntamente con el aire necesario para su combustión. La fuente de calor del generador de vapor es la reacción de combustión entre una sustancia combustible y el aire, portador del oxígeno, que es el comburente.

La energía requerida para la generación de vapor en los generadores convencionales procede de la energía química del combustible, la cual se libera en el proceso de combustión.

La reacción de combustión es una reacción química de oxidación rápida del combustible y reducción del comburente, acompañado de la liberación de una determinada cantidad de calor (reacción exotérmica).

En la combustión intervienen los siguientes elementos:

El aire, suministra el oxígeno como comburente para la reacción de combustión de los elementos combustibles del combustible.

El horno es donde se desarrolla el proceso de combustión.

Sistemas auxiliares, que garantizan la preparación adecuada del combustible y favorecen la mezcla del aire con el combustible. **Fig. 1.2**

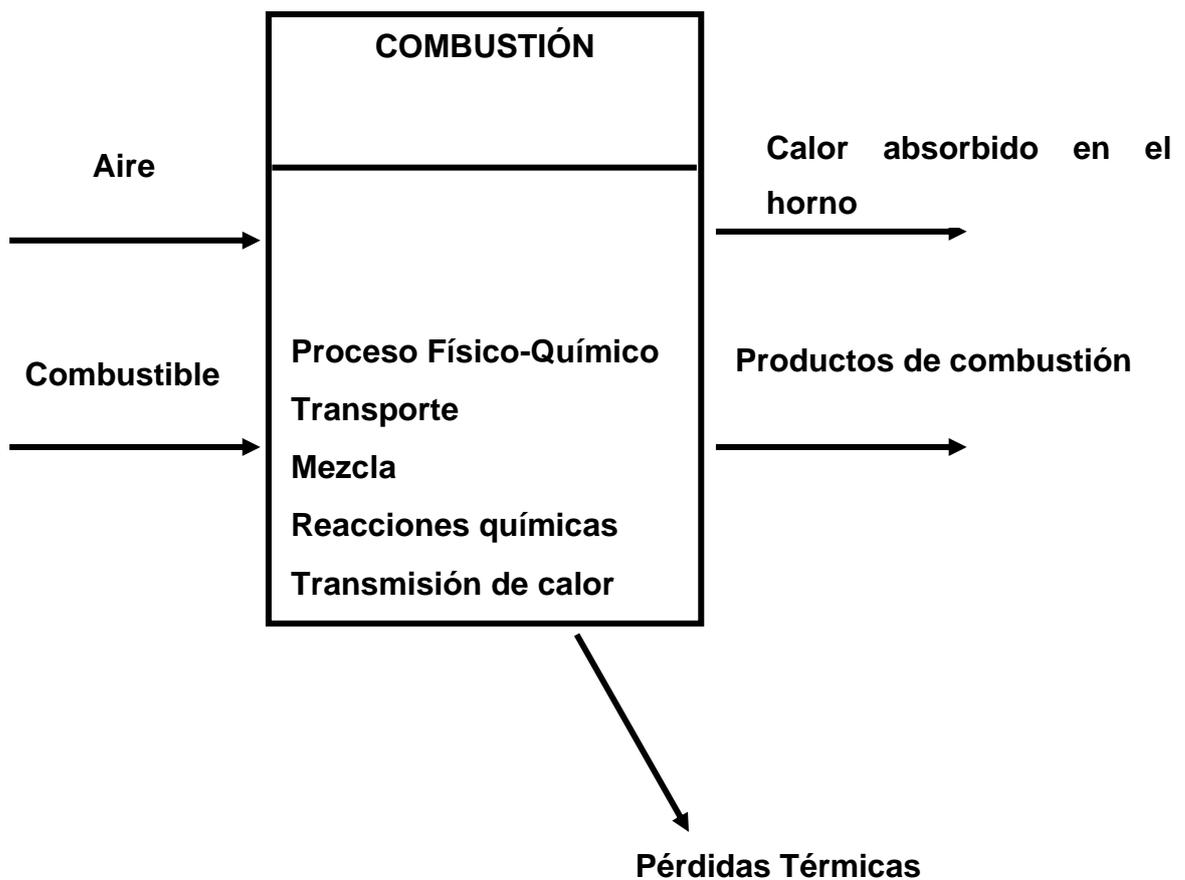


Fig. 1.2: Sistemas auxiliares, que garantizan la preparación adecuada del combustible.

I.4. Antecedentes sobre la aplicación de metodologías para determinar la eficiencia en calderas pirotubulares.

En la literatura consultada se encuentran diversas investigaciones relacionadas al análisis energético en instalaciones de vapor. En un estudio realizado por (Pérez-Sánchez et al., 2017) se presenta la evaluación de eficiencia energética realizada a una caldera pirotubular, con el objetivo de determinar costos de producción de vapor y proponer estrategias de mejoras de funcionamiento que permitan reducir el consumo de combustible.

Por su parte (Cabrera Rodríguez, 2011) propone soluciones para la mejora de la eficiencia en un sistema de vapor de un combinado de bebidas enfocado fundamentalmente hacia la caldera del tipo pirotubular. El autor en su propuesta recomienda la recuperación del condensado como una de las medidas de ahorro de energía, mejorando la eficiencia energética de la caldera, con lo que alcanza ahorros significativos en consumo de combustible, con un ahorro de 25 toneladas por año de fuel oil y una apreciable reducción de los gastos para la empresa en combustible de 18 334,73 pesos en CUP, así como unos 15 326,68 USD/año para el país.

Pérez-Sánchez, et al. (2017), llevó a cabo un trabajo en la fábrica de refrescos 23 de Agosto, con el fin de evaluar la eficiencia energética del generador de vapor, determinar las pérdidas de calor en las tuberías de vapor que se encuentran sin aislamiento, determinar el impacto medioambiental que producen los gases de combustión generados, evaluar el sistema de tratamiento del agua con que se alimenta la caldera (suavizador de agua), así como efectuar un análisis técnico-económico de dos variantes de mejoras, consistentes en 1) precalentamiento del agua con que se alimenta la caldera hasta los 90 °C, y 2) aislamiento de las tuberías de vapor con el aislante lana mineral. El empleo del aislante lana mineral redujo las pérdidas de calor en las tuberías en un 90%, aproximadamente. La eficiencia energética del generador de vapor fue de 86.64%. Se requiere invertir \$ 523.66 pesos cubanos (CUP) para adquirir e instalar las cantidades necesarias del aislante lana mineral, que se recuperará al cabo de 122 días. El suavizador opera de forma eficiente y los gases contaminantes alcanzan la máxima concentración a los 87.285 m, estando por encima del valor establecido en las normas cubanas. La aplicación de las dos

variantes de mejora propuestas trajo consigo un ahorro total anual de 9931.92 pesos por el combustible dejado de consumir en el generador de vapor. Se emplearon programas y herramientas computacionales tales como el Contamín, y hojas de cálculo Excel para el procesamiento de los datos adquiridos.

La investigación realizada por (Huamanchumo Calderón & Moreno Álvarez, 2022) tuvo como objetivo mejorar la eficiencia térmica en calderas pirotubulares mediante la regulación de parámetros de combustión para una empresa pesquera. Los objetivos específicos se orientaron a determinar la eficiencia térmica sin regulación de las calderas, regular el desarrollo de llama de combustión, registrar parámetros de combustión para cada desarrollo de llama y determinar las pérdidas de calor mediante método indirecto. La metodología de trabajo consistió en aplicar un proceso de regulación de longitud de llama en relación al aire de entrada y utilizar un analizador de gases para determinar los parámetros de combustión. Además, se siguieron los procedimientos establecidos por la NTP.350.300.2008 para determinar la eficiencia térmica de las calderas industriales. Los resultados obtenidos indican que antes de la regulación de combustión, las calderas N° 03 de 700 BHP, la caldera N° 04 de 800 BHP y la caldera N° 06 de 600 BHP tuvieron eficiencias térmicas de 80.93%, 81.64% y 76.37% respectivamente. Posterior a la regulación, se obtuvieron eficiencias de 83.20%, 83.08% y 81.37% respectivamente. Además, se observó una reducción en las emisiones de monóxido de carbono (CO). La caldera más crítica fue la N° 06 de 600 BHP, registrando un valor de 137.5 mg/Nm³ a longitud de 75% de llama y 162.5 mg/Nm³ al 100% de longitud de llama. Estos valores corresponden al 39.28% y 46.42% respectivamente del valor límite máximo permisible establecido por la NTP.300.301.2009.

I.5. Estudios sobre las pérdidas térmicas en calderas pirotubulares.

En estudios relacionados con la evaluación de pérdidas térmicas en calderas pirotubulares (Jiménez Borges et al., 2021) estima las pérdidas de calor por radiación aplicando los métodos convencionales de la transferencia de calor y el uso de la termografía, obtiene como resultado que un 13,7 % de la pérdida son por radiación, y se identifican las áreas con carencia de aislamiento en la superficie, así como las pérdidas por calor sensible de 9,56 %, provocado en gran medida por el alto exceso de aire.

El estudio realizado por (Jiménez Borges et al., 2021) empleó imágenes termográficas para analizar las temperaturas en diferentes zonas críticas de un generador de vapor del tipo piro tubular modelo CMS/C-660. Los resultados obtenidos revelaron que las temperaturas promedio en los laterales, posterior y frontal del equipo fueron de 44,21°C, 151,67°C y 170,25°C, respectivamente. Además, se observó un porcentaje de pérdidas de calor en las áreas seleccionadas de 14,7% en las zonas críticas y 20,7% en las zonas no-críticas. El uso de la termografía en este estudio permitió evaluar de manera precisa las pérdidas de calor por radiación y convección en las áreas identificadas como críticas y no-críticas, lo que contribuyó a mejorar la eficiencia del equipo.

El trabajo de investigación aborda el análisis y reducción de las pérdidas de calor en la caldera acuotubular No. 06 en agroindustrial Pomalca. (Torres Villalobos, 2022) realizó un diagnóstico actual de las condiciones de operación de la caldera, se cuantificó el flujo másico de combustible y se analizó la combustión del bagazo, determinando las pérdidas de calor. Se calculó la eficiencia actual del generador de vapor mediante el método directo y el método indirecto. Los resultados muestran que la eficiencia actual de la caldera es del 63% por el método directo y del 57% por el método indirecto. Además, se identificaron las fuentes de pérdidas y se sugieren áreas de mejora para aumentar la eficiencia de la caldera.

El trabajo de investigación "Balance térmico en una caldera piro tubular" (Panana Girio, 2015) se centra en el cálculo de las energías que ingresan, salen o se pierden en la caldera, considerando la ley de conservación de la energía. Se plantea un método para calcular las variables involucradas en el balance térmico, que servirán para el dimensionamiento posterior de la caldera. Los resultados obtenidos incluyen:

Flujo de energía que ingresa: $He = 9902.55$ kcal/kg de combustible

Flujo energía útil: $Qv = 7653.08$ kcal/kg de combustible

Pérdidas de energías: $Qp = 2243.48$ kcal/kg de combustible

Rendimiento de la caldera: $r = 77\%$

Área de calentamiento: $A = 399.8$ m²

Este trabajo de investigación muestra que es posible calcular y analizar las pérdidas de calor en una caldera pirotubular, permitiendo identificar áreas de mejora y optimizar el rendimiento de la caldera.

La tesis presentada por (Esquerre Verástegui, 2016) es un proyecto de diseño novedoso e innovador en el campo de equipos térmicos que busca desarrollar un método novedoso para el mejoramiento de una planta térmica mediante la implementación de caldera pirotubular vertical para uso industrial y docente, mediante la cual se determinan parámetros operativos adecuados, debido al novedoso diseño de la caldera (Modelo Medusa) permitirá aprovechar el calor al máximo ya que se reduce las pérdidas de calor debido a que los tubos pirotubulares serán solo de fuego y estarán en contacto directo con el agua y ya no habrá pérdidas de calor por la existencia de tubos de humo.

El trabajo de investigación descrito (Cansaya Quispe & Huallata Apaza, 2015) se centra en el cálculo de las calderas pirotubulares en alturas superiores a los 3800 m.s.n.m., identificando los parámetros de funcionamiento y los problemas asociados a estas condiciones. Se menciona la importancia de la eficiencia en las calderas pirotubulares y cómo se calcula mediante el método de pérdidas de calor. También se destaca el diseño novedoso de la caldera pirotubular vertical (Modelo Medusa) y su potencial para aprovechar el calor al máximo en altitudes superiores.

En el trabajo de Jiménez Borges et al. (2021), se realiza un análisis termográfico utilizando la cámara térmica Testo-875 desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo al generador de vapor pirotubular modelo CMS/C-660, analizando la dependencia que existe entre el rendimiento y la radiación que este equipo emite. Se realiza la revisión de la literatura y se seleccionan las diferentes expresiones para calcular las pérdidas por radiación (q_5) y su dependencia con el área superficial y la temperatura exterior de las paredes. Mediante el uso de la termografía, se determinan las áreas con carencia de aislamiento en la superficie del generador, así como se cuantifican las áreas seleccionadas como críticas mediante la modelación en 2D a partir del software AutoCAD 2019. Fueron estimadas las pérdidas por radiación en cada una de las zonas críticas, donde la cuantificación de dicha pérdida reflejó deficiencias en el aislamiento térmico. Finalmente, se determinó la cantidad de potencia irradiada al medio para cada

una de las condiciones evaluadas, para el caso de las zonas críticas la potencia irradiada fue de 6 336 kJ/h mientras que para las zonas no-críticas 2 880 kJ/h, demostrándose el mal estado técnico en el generador de vapor.

El trabajo de investigación de 2022 Irigoien Garcia (2022), se enfoca en el aumento del rendimiento térmico de una caldera pirotubular de un hospital público en Perú, que actualmente opera a solo el 25% de su capacidad. Se aplicó el balance de masa y energía para determinar el rendimiento actual de la caldera, que no clasifica como categoría A según la norma técnica peruana. Se identificaron posibles mejoras energéticas, como la reducción de pérdidas de calor por combustión incompleta, el aprovechamiento del calor contenido en los gases residuales de chimenea, la reducción de pérdida de calor por convección desde la pared de la caldera al medio ambiente y la instalación de un separador de vapor flash de las purgas de calderas. La aplicación de estas mejoras energéticas daría como resultado una reducción del consumo de combustible y un aumento del rendimiento térmico de la caldera. Se realizó un análisis económico y se determinó que la inversión para aplicar las mejoras sería de 50 124 soles/mes con un beneficio neto de 7,814 soles/mes y un período de retorno de la inversión de 6.96 meses.

El trabajo de Fuentes & Lillo (2022), busca mejorar la eficiencia de las calderas pirotubulares mediante la implementación de un simulador que emula la operación de una caldera pirotubular de 4 pasos, generando vapor. El simulador incluye modelos para el proceso de combustión, entregando la opción de seleccionar diferentes tipos de combustibles, los procesos de transferencia de calor en el tubo hogar y en los tres pasos restantes. Se obtienen las temperaturas del circuito de humos, el rendimiento térmico de la caldera y las emisiones gaseosas generadas para diferentes condiciones de regulación del exceso de aire. El simulador también incluye la parametrización de emisividad de la llama en función de las fracciones volumétricas de hollín de los distintos combustibles, a partir de relaciones de emisividad vs la relación C/H. El modelo es validado mediante el análisis de resultados experimentales obtenidos de trabajos previos, con la caldera operando con diésel. Las correlaciones de diferentes propiedades termofísicas y correlaciones semiempíricas se obtuvieron mediante la simulación en la plataforma EES, para luego implementarlas en los modelos del simulador.

El simulador es una herramienta útil para estudiantes de ingeniería, ya que permite comprender y mejorar el funcionamiento de las calderas pirotubulares, reduciendo las pérdidas de calor y aumentando la eficiencia.

La investigación de Quiñones & IDERTE (2021), tiene como propósito determinar y analizar la eficacia de ignición y la eficiencia térmica de un caldero pirotubular a través del balance térmico. Se aplicó la primera ley de la termodinámica y la Norma técnica peruana (NTP 350.300.2008) para determinar las pérdidas de calor y la eficiencia térmica del generador de vapor. Se realizaron cinco mediciones y se obtuvo una eficiencia térmica promedio de 77.85%. Se propuso una mejora energética a través del precalentamiento del agua de alimentación, lo que permitió mejorar los indicadores de flujo de producción de vapor, reducir el consumo de combustible y aumentar la eficiencia térmica a 81.95%. El análisis económico mostró que la inversión para aplicar las mejoras sería de S/ 50,124 y el período de retorno de la inversión es de 6.96 meses.

I.6. Impacto ambiental en calderas pirotubulares.

Las calderas industriales y de servicios son potencialmente contaminantes del medio ambiente. En un estudio realizado por Jiménez Borges, et al (2016), declara los valores significativos en cuanto a consumo de combustible en estas instalaciones, así como el alto impacto ambiental causado por las emisiones de $\text{kgCO}_2/\text{año}$ al medio, aspecto que se extiende para diversas capacidades y tipo de combustibles en las 1837 calderas instaladas en el país.

El trabajo realizado por Ibañez Esteban (s. f.), centrado en el estudio integral de las calderas pirotubulares de baja presión, con enfoque en los subsistemas de combustión e intercambio de calor. Se analizan los fallos potenciales y reales que ocurren en estas calderas en las condiciones de explotación de los sistemas de servicio de la salud. Se proponen medidas técnicas, organizativas, operacionales y de mantenimiento para mitigar el impacto ambiental de estas calderas. Además, se realiza un análisis de la contaminación ambiental causada por estos equipos, identificando los principales contaminantes y el área afectada.

El documento del autor (Ibañez Esteban, s. f.)detalla el proceso de elaboración de propuestas de mejora para la actividad de los hornos y calderos en una

refinería, con el propósito de reducir el impacto ambiental generado. En primer lugar, se presenta un marco teórico que define las refinerías, contextualiza a los hornos y calderas dentro de este tipo de planta, y explica las técnicas de evaluación ambiental. Posteriormente, se describe el proceso de evaluación ambiental elegido, que fue la matriz de aspectos e impactos ambientales, aplicado a los hornos y calderas de la empresa seleccionada, y se muestran los resultados identificados. Finalmente, se presentan las propuestas de mejora hacia los puntos críticos hallados en el proceso de evaluación ambiental. Las propuestas de mejora se centran en la reducción del impacto ambiental, la optimización de los procesos de combustión, y la mejora de la eficiencia energética de los hornos y calderos en la refinería.

Según el trabajo realizado por Bernal et al. (s. f.), Colombia es el primer productor de panela en América y el segundo, a nivel mundial, después de la India. A pesar del adelanto tecnológico en el país para este sector agroindustrial, aún persisten problemas tecnológicos que afectan directamente el proceso de producción panelera, la rentabilidad y sostenibilidad económica del mismo. Entre los principales problemas se encuentran la baja eficiencia energética, que incrementa los costos de producción y los problemas ambientales por emisiones de gases y calor al ambiente. Por estos motivos, CORPOICA propuso diseñar, construir y optimizar un sistema de evaporación de múltiple efecto, que busca aprovechar el vapor generado en la producción de panela y así mejorar la eficiencia térmica del proceso. Con el desarrollo del prototipo, se espera una reducción de 0,3 a 0,5 kg de bagazo (0% H b.h.) por kg de panela, pasando desde 1,5 - 1,8 kg a 1,2 – 1,3 kg de bagazo consumido. Esto representará generar excedentes de bagazo para otros usos y procesos y disminuir las emisiones ambientales en cerca del 30%.

Conclusiones del capítulo I

1. La evaluación energética de sistemas de generación de vapor en salas de calderas es un tema de gran importancia para determinar eficiencia y mejorar uso de los recursos energéticos. Los resultados de estos estudios permiten identificar oportunidades de mejora en términos de consumo de energía, reducción de costos e impacto ambiental.

2. La búsqueda de antecedentes de otros autores sobre los temas de eficiencia, pérdidas térmicas e impacto ambiental de las calderas es fundamental para contextualizar y fundamentar la relevancia de estos aspectos en el ámbito de estudio.
3. El consumo de combustible en las salas de calderas representa un desafío significativo en términos de impacto ambiental y cambio climático; por tanto, se necesita realizar una evaluación exhaustiva para identificar oportunidades de reducción y mitigación de las emisiones de CO₂.



Capítulo 2

Capítulo II: Metodología para evaluar la eficiencia del generador de vapor del CEA.

Introducción al capítulo II

En este capítulo se describe el sistema de generación de vapor del Centro Especializado Ambulatorio (CEA), así como la metodología utilizada para el cálculo de la eficiencia de caldera (ASME), las pérdidas de calor sensible con los gases de salida y las pérdidas de calor por radiación y convección. El estudio se apoyó en la técnica termográfica para la estimación de las temperaturas en las superficies del generador de vapor, además de formulaciones empíricas recomendadas en investigaciones realizadas como (*Librería Virtual Cuba | Comprar online Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión. Combustibles Sólidos*, s. f.)

II.1. Descripción del sistema de generación de vapor.

Los generadores de vapor que forman parte del proceso, objeto de estudio, están ubicados en el Centro Especializado Ambulatorio de Cienfuegos (CEA). En esta institución, el uso del vapor tiene diversas aplicaciones. Se necesita para la esterilización del material médico y quirúrgico, que requiere de altas temperaturas; para la producción de agua caliente en los servicios auxiliares, y también se emplea en el proceso de cocción de alimentos.

La caldera objeto de estudio fue instalada en el año 2005, modelo CMS-C/440 (**fig.2.1**). Por razones de mantenimiento del otro generador, esta caldera ha funcionado ininterrumpidamente durante 7 meses. Actualmente el horario de operación, es de 5:00 am hasta las 12:00 pm.

La capacidad de generación de vapor máxima es de 440 kg/h; el consumo de combustible es de 28,69 kg/h de combustible y trabaja con una presión máxima de 0,9 Mpa. Los parámetros técnicos generales de la caldera se presentan en la **tabla 2.1**.



Fig. 2.1 Imagen de la caldera CMS-C/440

Tabla 2.1 Parámetros técnicos principales del generador de vapor, modelo CMS-C/440

Parámetros principales	Unidades de medida	Modelo: CMS-C/440
Presión de cálculo	MPa	1
Presión máxima de trabajo	MPa	0,9
Presión de prueba hidrostática	MPa	1,5
Producción nominal de vapor	Kg/h	440
Producción de vapor por m ² de superficie de calefacción	Kg/m ²	27,5
Temperatura del vapor	°C	184
Temperatura de agua de alimentar	°C	80
Temperatura de los gases salida del generador	°C	286,0

Superficie de transferencia o calefacción total	m ²	16
Carga térmica Potencia	Kcal/h	257153
térmica útil	kW	299,069
Volumen de agua nivel medio	M ³	1,52

II.2. Combustible de trabajo.

El combustible de trabajo es un diesel típico, cuyos elementos fundamentales son: carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N), además se encuentran en su composición las cenizas (A) y la humedad (W). El poder calorífico inferior de trabajo utilizado en los cálculos fue de 42 385,2 KJ/Kg. (*Librería Virtual Cuba | Comprar online Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión. Combustibles Sólidos, s. f.*)

II.3. Análisis del consumo de combustible en caldera: línea base energética.

Para evaluar el consumo de combustible de la caldera, se obtuvo la línea de base energética, que consiste en determinar el consumo de combustible en litros por hora (l/h) en función de los meses de trabajo. La línea de base se establece a partir de mediciones y registros periódicos del consumo de combustible, durante un período de tiempo determinado, en este caso aprox. 7 meses. En la **fig. 2.1** se presenta este análisis para la caldera modelo CMS-C/440.

Es importante tener en cuenta que el consumo de combustible puede variar en función de las necesidades y la demanda de vapor del hospital; por lo tanto, la línea de base energética debe ser revisada y actualizada regularmente para reflejar los cambios. En la fig.2.1 se muestran los consumos durante la operación, los cuales variaron, básicamente, entre 25,7 y 27,37 l/h, respectivamente. En los primeros meses no se reportaron consumos, por trabajos de mantenimiento.

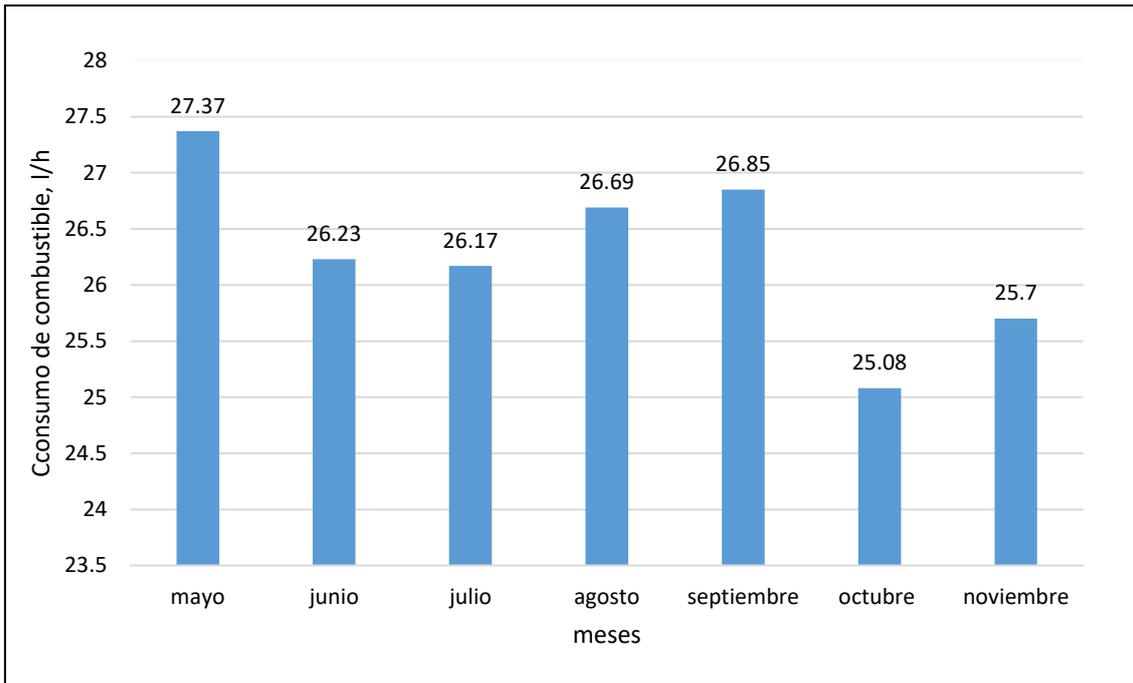


Fig. 2.1: Línea de base energética del consumo de combustible de la caldera modelo CMS-C/440 (Fuente: elaboración propia).

II.4. Cálculo de la eficiencia energética.

Para el cálculo de la eficiencia se utilizó el "método directo" de entradas y salidas, y el "método indirecto o de pérdidas" de la Norma ASME.

II.4.1. Determinación de la eficiencia por el método directo.

El cálculo de la eficiencia por el método directo se realizó, según la expresión que se relaciona con la **ecuación 2.1**:

$$\eta = \frac{D_{vs} * (I_{vs} - I_a)}{(B * Q_s)} * 100 \quad \text{Ec 2.1}$$

Donde,

D_{vs} : Flujo másico del vapor generado, (Kg/h)

I_{vs} : Entalpia del vapor saturado, (KJ/Kg)

I_a : Entalpia del agua de alimentación, (KJ/Kg)

B : flujo de combustible, (Kg/h)

Q_5 : Poder calorífico superior o neto del combustible, (KJ/Kg)

II.4.2. Determinación de la eficiencia por el método indirecto.

En el método indirecto o de pérdidas, la eficiencia se calcula restándole a 100 el valor de las pérdidas de calor, también se expresa como un porcentaje:

ecuación 2.2.

$$\eta = 100 - \sum q_p \quad [\%] \quad \text{Ec 2.2}$$

Dónde,

q_2 : Pérdidas por los gases de combustión de salida.

q_3 : Pérdidas por incombustión química.

q_5 : Pérdidas por radiación y convección.

Pérdidas térmicas por los gases de salida (q_2)

El calor que se pierde a través de la masa de gases que salen de la caldera representan la mayor pérdida del sistema y su valor relativo se determina con la

ecuación 2.3:

$$q_2 = \frac{(I_g - \alpha I_{af}^0)(100 - q_4)}{Q_d^t} \quad [\%] \quad \text{Ec 2.3}$$

Dónde,

I_g : Entalpía de los gases de salida, (kJ/kg).

α : Coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera.

I_{af}^0 : Entalpía del volumen teórico de aire frío, (kJ/kg).

Q_d^t : Calor disponible de la masa de trabajo, (kJ/kg).

La entalpía de salida de los gases se determina por la **ecuación 2.4:**

$$I_g = I_g^0 + (\alpha - 1)I_a^0 + I_{\Delta V_{H_2O}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.4}$$

Dónde,

I_g^0 : Entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión, (kJ/kg).

I_a^0 : Entalpía del aire en exceso, (kJ/kg).

$I_{\Delta V_{H_2O}}$: Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso, (kJ/kg).

La entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión se calcula por la siguiente **ecuación 2.5**:

$$I_g^0 = V_{RO_2} * (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 * (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.5}$$

Donde,

V_{RO_2} : Volumen de los gases triatómicos.

$(c\vartheta)_{RO_2}$: Entalpía específica de los gases triatómicos, (Anexo 1).

$V_{N_2}^0$: Volumen teórico del nitrógeno.

$(c\vartheta)_{N_2}$: Entalpía específica del nitrógeno, (Anexo 1).

$V_{H_2O}^0$: Volumen teórico del vapor de agua.

$(c\vartheta)_{H_2O}$: Entalpía específica del vapor de agua, (Anexo 1).

Los valores de V_{RO_2} ; $V_{N_2}^0$ y $V_{H_2O}^0$ son obtenidos por las **ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8**:

$$V_{RO_2} = 1,866 * \frac{(C^t + 0,375 * S^t)}{100} \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.6}$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 * V_a^0 + 0,8 * \frac{N^t}{100} \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.7}$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 * H^t + 0,0124 * W^t + 0,025 * V_a^0 \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.8}$$

Para el cálculo de la entalpía teórica del aire se utiliza la **ecuación 2.11**.

$$I_a^0 = 39,8 * V_a^0 \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.11}$$

Para el cálculo del volumen teórico del aire a 0°C y 101,3 KPa, se determina por la **ecuación 2.12**.

$$V_a^0 = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.12}$$

Según recomendaciones de la bibliografía teoría y práctica de los procesos de combustibles el volumen teórico del aire por la formula empírica mostrada en la **ecuación 2.13**.

$$V_a^0 = \frac{1}{a}(Q_i^t + b) \text{ (m}^3\text{N/kg)} \quad \text{Ec 2.13}$$

Donde, Para el combustible de trabajo utilizado $a= 4050$ y $b= 2390$. (Fuente: (Rodríguez Arias & Rosabal Ponce, s. f.)

Cálculo de la entalpía del volumen de vapor de agua en exceso **ecuación 2.14.**

$$I_{\Delta V_{H_2O}} = 0,016(\alpha - 1)V_a^0 * (c_{\vartheta})_{H_2O} \text{ (kJ/kg)} \quad \text{Ec 2.14}$$

Para el cálculo de las perdidas q_2 también se puede utilizar la **ecuación 2.15.**

$$I_g = (V_g * c_g + V_{H_2O} * c_{H_2O})t_g \text{ (kJ/kg)} \quad \text{Ec 2.15}$$

Donde,

El volumen de los productos de la combustión, cuando $\alpha > 1$ se obtiene por la **ecuación 2.16.**

$$V_g = V_g^0 + 1,025(\alpha - 1)V_a^0 \text{ (m}^3\text{N/kg)} \quad \text{Ec 2.16}$$

La fórmula empírica para el cálculo del volumen teórico de los gases de combustión, a 00C y 101,3 KPa, se obtiene por la **ecuación 2.17.**

$$V_g^0 = \frac{1}{a}(Q_i^t + b) \text{ (m}^3\text{N/kg)} \quad \text{Ec 2.17}$$

Donde, Para el combustible de trabajo utilizado $a= 4141$ y $b= 7355$. (Fuente: (Rodríguez Arias & Rosabal Ponce, s. f.)

La sumatoria de los calores específicos medidos a presión constante de los productos de la combustión puede determinarse, por el cálculo aproximado, la **ecuación 2.18.**

$$c_g = 1,352 + 0,0000753 * t \text{ [KJ/m}^3\text{NK]} \quad \text{Ec 2.18}$$

Calor específico medido del vapor de agua, (c_{H_2O}). Mediante la **ecuación 2.19.**

$$c_{H_2O} = 1,470 + 0,000111 * t \text{ [KJ/m}^3\text{NK]} \quad \text{Ec 2.19}$$

Pérdidas por convección y radiación: (q₅)

Esta pérdida ocurre cuando el calor generado durante el proceso de combustión se transfiere al medio circundante se determina por la **ecuación 2.20**.

$$q_5 = \frac{1000 * A}{B * Q_d} * (\alpha_c + \alpha_{rad}) * (T_p^2 - T_{af}^2) \quad Ec 2.20$$

Donde,

B : Flujo de combustible, (kg/s).

Q_d : Calor disponible, (kJ/kg).

α_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección para gases, (W/m²K).

α_{rad} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación, (W/m²K).

T_p : Temperatura superficial de las paredes, (K).

T_{af} : Temperatura ambiente, (K).

Para el caso de los gases el coeficiente de transferencia de calor por convección (α_c) se encuentra en el intervalo de 2-25 W/m² K ((Yunus A & Boles, s. f.)). La Constante de Stefan Boltzmann, **ecuación 2.21**.

$$C_o = 5,97 * 10^{-8} \frac{W}{m * K} \quad Ec 2.21$$

(Çengel, 2011) El coeficiente de transferencia de calor por radiación, puede ser determinado mediante la **ecuación 2.22**.

$$\alpha_{rad} = E * C_o (T_p + T_{af}) (T_p + T_{af}) \quad Ec 2.22$$

Ecuación 3. Coeficiente de transferencia de calor por radiación, (α_{rad}).

Donde E: Emisividad del material del generador de vapor E=0,91

II.5. Análisis de las pérdidas por radiación con apoyo de la termografía.

La termografía es una técnica relativamente moderna, que se fundamenta en la Ley de Stefan Boltzmann, donde se utiliza la radiación emitida por los cuerpos por estar a temperaturas mayores al cero absoluto, como variable relacionada con la temperatura (Sen & Al-Habaibeh, 2019).

La **tabla 2.2** presenta las características técnicas de la cámara termográfica modelo testo 875 utilizada para las mediciones de temperatura exterior del generador de vapor.

Tabla2.2. Características técnicas de la cámara termográfica

Medición	Valores
Rango	-30 a +100 °C / 0 a +350 °C
Exactitud	±2 °C, ±2 % del valor medido
Medición de alta temperatura - opcional	+350 ... +550 °C
Exactitud	±3 % del v.m. a +350 ... +550 °C
Emisividad / temperatura reflejada	0.01 ... 1 / manual
Temperatura funcionamiento	-15 ... +40 °C
Temperatura almacenamiento	-30 ... +60 °C
Humedad del aire	20 a 80 % HR sin condensación
Peso	900 g

Para el procesamiento de las imágenes termográficas se utilizó el Software IRISoft, que permite el manejo de las imágenes a una escala visual con un alto

contenido en la calidad de las representaciones, permitiendo también ajustes en la emisividad del material. El software permite ajustar también parámetros en la temperatura reflejada, temperatura ambiente, así como posibilitar perfiles completos de temperatura en una zona a analizar. La temperatura promedio en una zona determinada, el punto más frío o caliente, así como la superposición de la imagen real con la imagen termográfica.

Este análisis realizado en la caldera después de esta haber estabilizado su régimen de trabajo. En el estudio se realizaron las mediciones termográficas en la parte frontal donde se encuentra el quemador, la zona lateral y la parte posterior

II.6. Análisis de impacto ambiental.

Las calderas industriales y de servicio son potencialmente contaminantes del medio ambiente, durante los momentos del arranque y hasta que se logre la homogeneidad en la mezcla y la estabilidad en la combustión la emisión de partículas de combustible que atraviesan todo el tracto de gases y salen por la chimenea sin combustionar llevando al medio ambiente su carga contaminante (Laverde, 2013) Para determinar el impacto ambiental que produce una caldera, se determina la cantidad de CO₂ (**ecuación 2.22**), que se emite al ambiente producto de la combustión.

$$CO_2 = F_e \times B$$

Ec 2.22

Dónde:

Fe: Factor de emisión: diésel (l) 2,79 kg CO₂/l del diésel (GEI 2011)

B: Consumo de combustible en tiempo de operación, (Kg/h)

Conclusiones del capítulo II

1. Como resultado del procesamiento de los registros del consumo de combustible, se obtuvo la línea base energética de la caldera objeto de estudio, a partir de la cual se pueden establecer los potenciales de ahorro y proponer medidas para la mejora de la eficiencia energética.
2. La combinación de las expresiones del método indirecto con las técnicas termográfica permite estimar el valor de las pérdidas por radiación y convección en calderas con suficiente aproximación.
3. La metodología empleada para la evaluación de la eficiencia energética incluyó el cálculo de las emisiones de CO₂ para determinar el impacto ambiental.



Capítulo 3

Capítulo III: Resultados de la evaluación e impacto ambiental.

Introducción al capítulo III

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la evaluación energética de la caldera por los métodos directo e indirecto. En cuanto al análisis de pérdidas térmicas se utiliza la termografía, una técnica no invasiva que permite visualizar y cuantificar las pérdidas de calor por radiación. Se plantean una serie de medidas para el aumento de la eficiencia energética y se determinan las emisiones de CO₂ en el período de tiempo de operación.

III.2 Resultados de la eficiencia por el método directo.

Según la metodología mostrada en el epígrafe II.4.1 se procedió al cálculo por este método como se muestra en la **tabla 3.1** los resultados obtenidos.

Tabla 3.1. resultado del cálculo del método directo (Elaboración propia).

Método directo.	Unidad	Resultado
$\eta = \frac{D_{vs} * (I_{vs} - I_a)}{(B * Q_s)} * 100$	%	71,52

Ecuaciones auxiliares	Unidades	Resultados
$I_g = I_g^0 + (\alpha - 1)I_a^0 + I_{\Delta V_{H_2O}}$	(kJ/kg)	16434,98
$I_g^0 = V_{RO_2} * (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 * (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 * (c\vartheta)_{H_2O}$	(kJ/kg)	5351,15
$V_{RO_2} = 1,866 * \frac{(C^t + 0,375 * S^t)}{100}$	(m ³ N/kg)	1,552
$V_{N_2}^0 = 0,79 * V_a^0 + 0,8 * \frac{N^t}{100}$	(m ³ N/kg)	8,05

$V_{H_2O}^0 = 0,111 * H^t + 0,0124 * W^t + 0,025 * V_a^0$	(m ³ N/kg)	3,144
$I_a^0 = 39,8 * V_a^0$	(kJ/kg)	3060,16

III.3. Resultados de la eficiencia por el método indirecto.

El análisis de para las pérdidas térmicas q_2 de los gases de salida es una evaluación importante para determinar la eficiencia energética de una instalación. En este análisis, se busca identificar y cuantificar las pérdidas de calor que ocurren en los gases de salida en el equipo de combustión de la sala evaluada.

Para determinar el valor de q_2 , se requirió resolver varias ecuaciones auxiliares. Este proceso implicó realizar una serie de cálculos y análisis exhaustivos para obtener la solución precisa. **Tabla 3.2**

Tabla 3.2. Ecuaciones auxiliares (Elaboración propia)

$$q_2 = \frac{(16\,434,98 - 1,2 * 3060,16)(100 - 0)}{42\,385,2}$$

$$q_2 = 7,2\%$$

III.4. Análisis de las perdidas por radiación con apoyo de la termografía.

La termografía se empleó con el fin de evaluar las pérdidas por radiación en diversas áreas de la caldera objeto de estudio. Los resultados obtenidos en la cara frontal de la caldera (**figura 3.1**) revelan que el aislamiento térmico de dicha superficie se encuentra en un estado técnico satisfactorio. Se registró un valor aproximado de 48.90°C, el cual se mantiene por debajo del umbral de temperatura recomendado de 50°C (Jiménez Borges et al., 2016). Esta evidencia indica que el aislamiento está cumpliendo efectivamente su función de minimizar las pérdidas de calor por radiación, garantizando así un rendimiento óptimo del sistema.

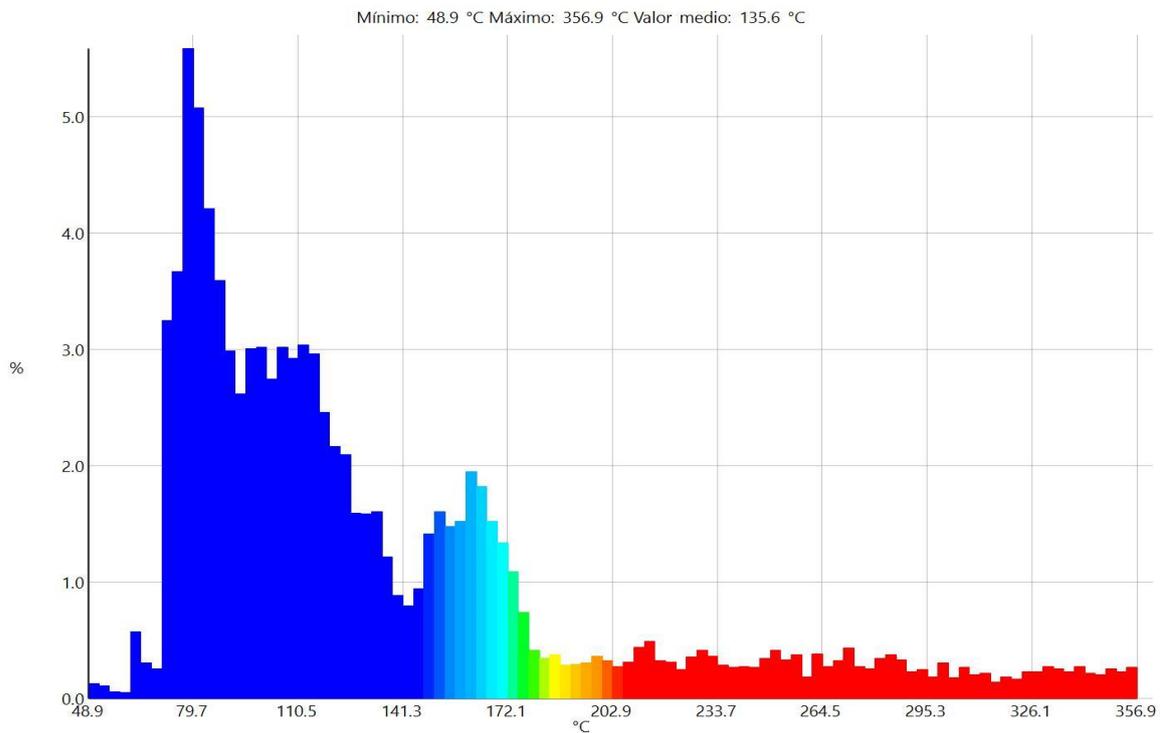
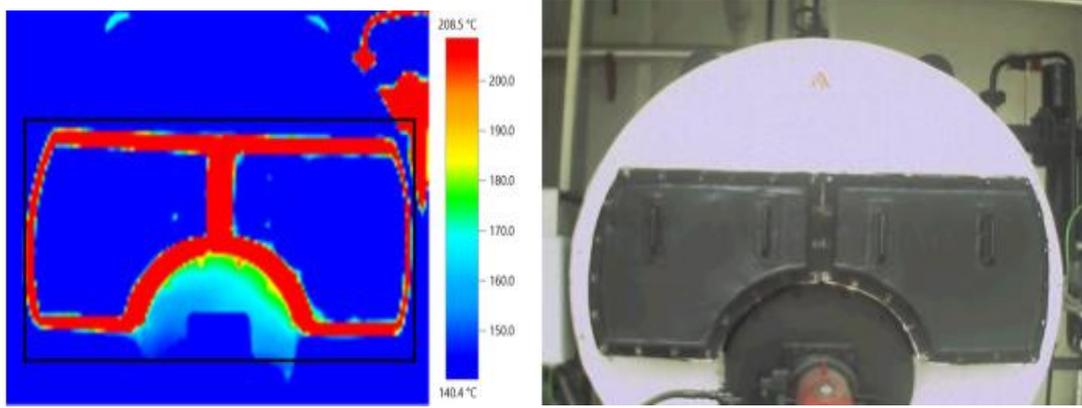


Fig. 3.1 Imagen real, termográfica e histograma de la cara frontal de la caldera.

La temperatura máxima de 134,50°C en las paredes laterales de la caldera (**figura 3.2**) corresponden al lugar donde se encuentran los remaches de las planchas. La temperatura promedio de esta área alcanza los 70,5°C, este valor está por debajo del umbral de 100°C, que es típico para este tipo de calderas. Por ser esta la mayor área superficial se considera un buen aislamiento térmico.

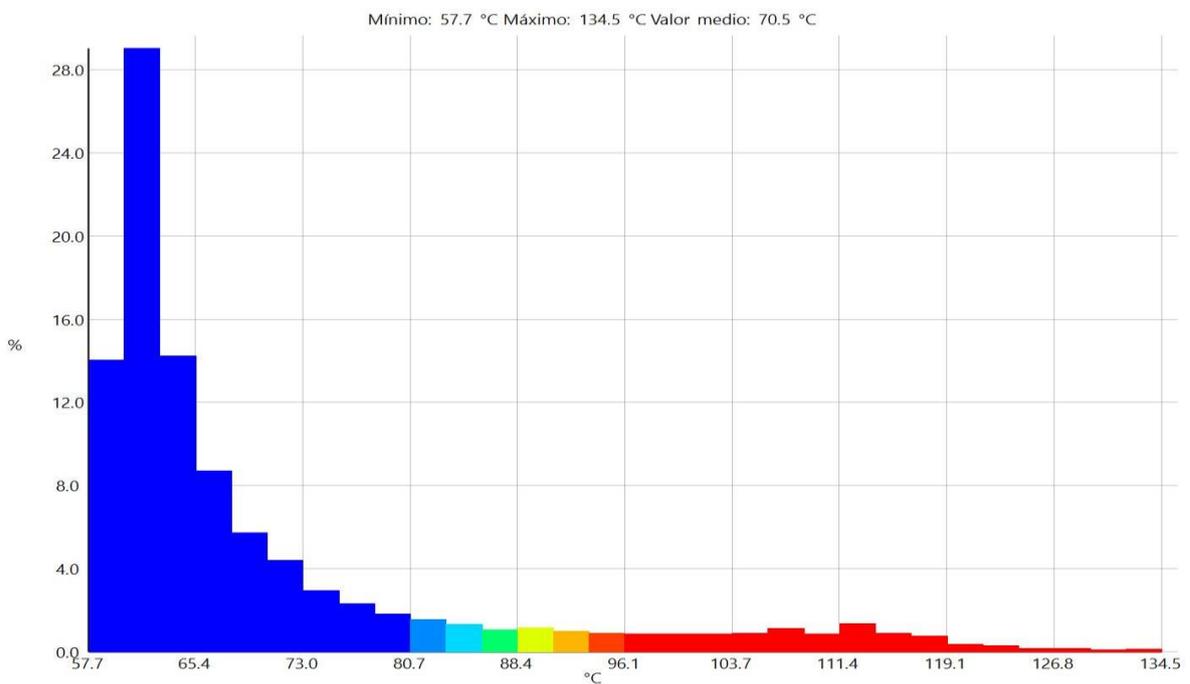
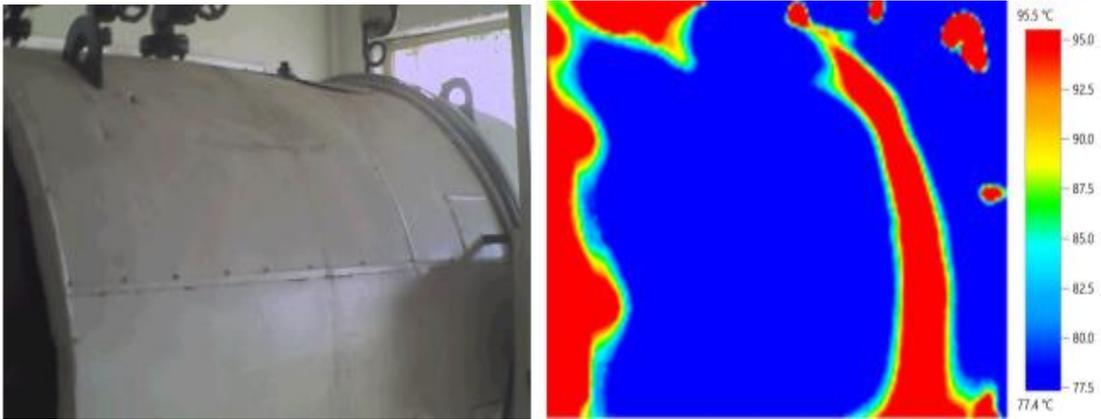


Fig. 3.1 Imagen real, termográfica e histograma de la cara frontal de la caldera.

La situación observada en la zona del fondo de la caldera es desfavorable, ya que se registran picos térmicos de hasta casi 247,5°C, con un promedio de 192,8°C. Estos valores superan los rangos permisibles de temperatura, lo que podría indicar una ineficiencia en el funcionamiento de la caldera. Según la literatura revisada, las temperaturas máximas de la llama en calderas suelen estar en el rango de 200-300°C. Por lo tanto, los valores registrados en la zona del fondo de la caldera, especialmente los picos térmicos, exceden los rangos esperados para un funcionamiento eficiente. Esta situación puede ser provocada

por un mal ajuste del quemador o por mal aislamiento, cualquiera de las dos probables causas hace necesario una supervisión del personal de mantenimiento por los daños y pérdidas que esto ocasiona.(Jiménez Borges et al., 2016)

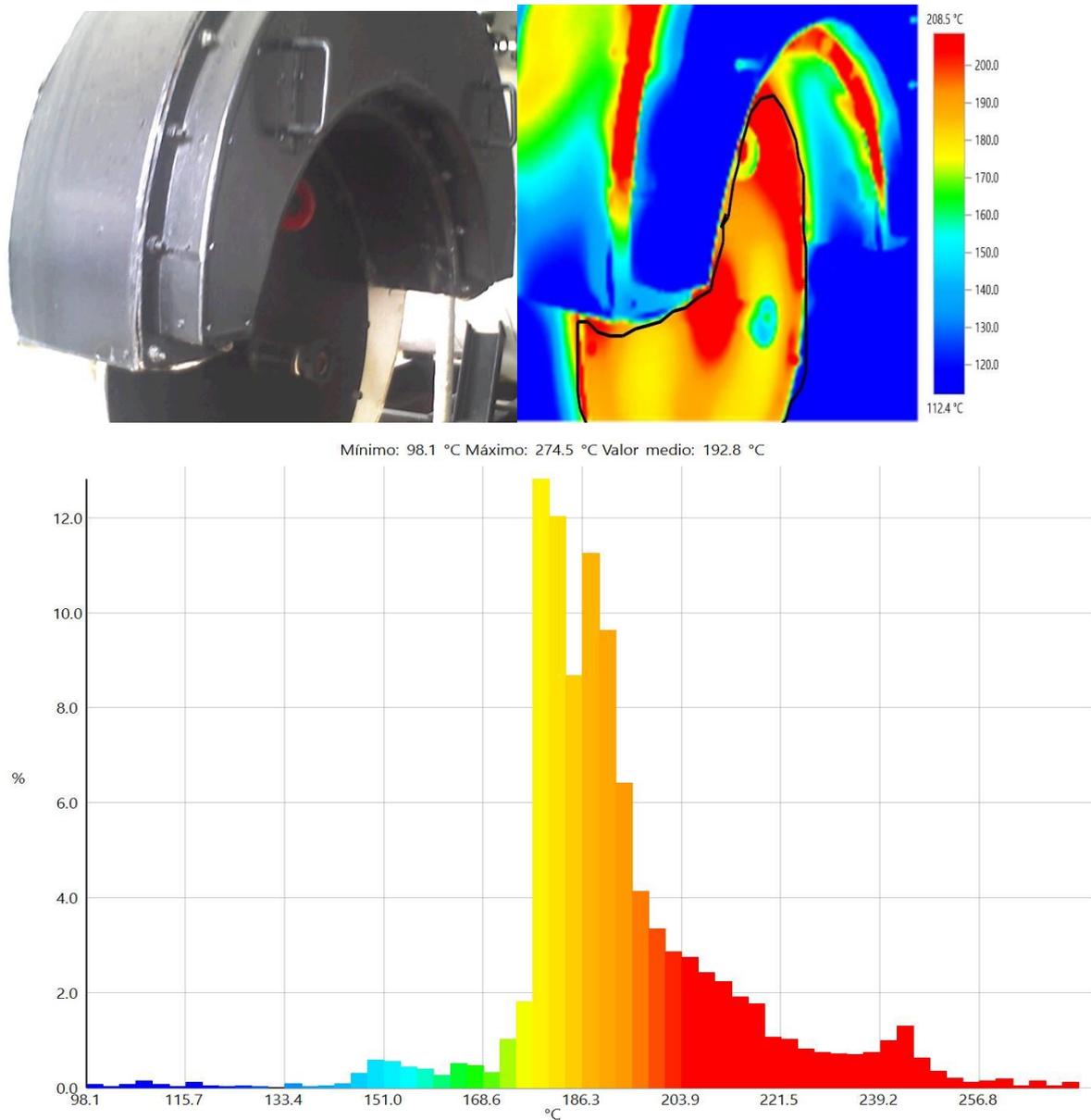


Fig. 3.1 Zona del fondo, termográfica e histograma de la cara frontal de la caldera.

El análisis de q5 mediante termografía es una técnica efectiva para evaluar y diagnosticar posibles problemas en una instalación. La termografía consiste en el uso de cámaras térmicas para medir y visualizar las diferencias de temperatura en diferentes superficies. Al realizar un análisis de q5 mediante termografía, se

pueden identificar puntos calientes o fríos anormales en la instalación, lo que podría indicar problemas de aislamiento, fugas de calor, mal funcionamiento del equipo.

$$q_5 = \frac{1000 * 0,84}{28,69 \text{ kg/h} * 42 \text{ 385,2 KJ/Kg}} * (\alpha_c + \alpha_{\text{rad}}) * (465,2^2 - 303,15^2)$$

$$q_5 = 8,78 \%$$

Para el caso de los gases el coeficiente de transferencia de calor por convección se encuentra en el intervalo de 2-25 W/m² K (*Termodinámica | Biblioteca Hernán Malo González - Universidad del Azuay, s. f.*).

La eficiencia por el método indirecto la determinamos por la ecuación II.4.2 la cual se describe como la suma de las pérdidas analizadas, en la tabla se muestra el resultado

Método indirecto.	Unidad	Resultado
$\eta = 100 - \sum q_p$	%	84,02

III.5. Propuestas de mejoras de eficiencia energética.

Teniendo en cuenta que las pérdidas por radiación en la zona del fondo de la caldera es una de las más significativas, se debe revisar las causas principales de la misma y proponer medidas de ahorro energético. En este caso una medida operacional es el ajuste de la potencia del quemador, con el objetivo de disminuir la temperatura en el área superficial que corresponde al fondo de la caldera y evitar mayores pérdidas por radiación.

Además, se pueden aplicar otras medidas como el mantenimiento sistemático de los quemadores, revisión periódica del aislamiento térmico, limpieza adecuada de las superficies de calentamiento, así como realizar pruebas de eficiencia periódicamente.

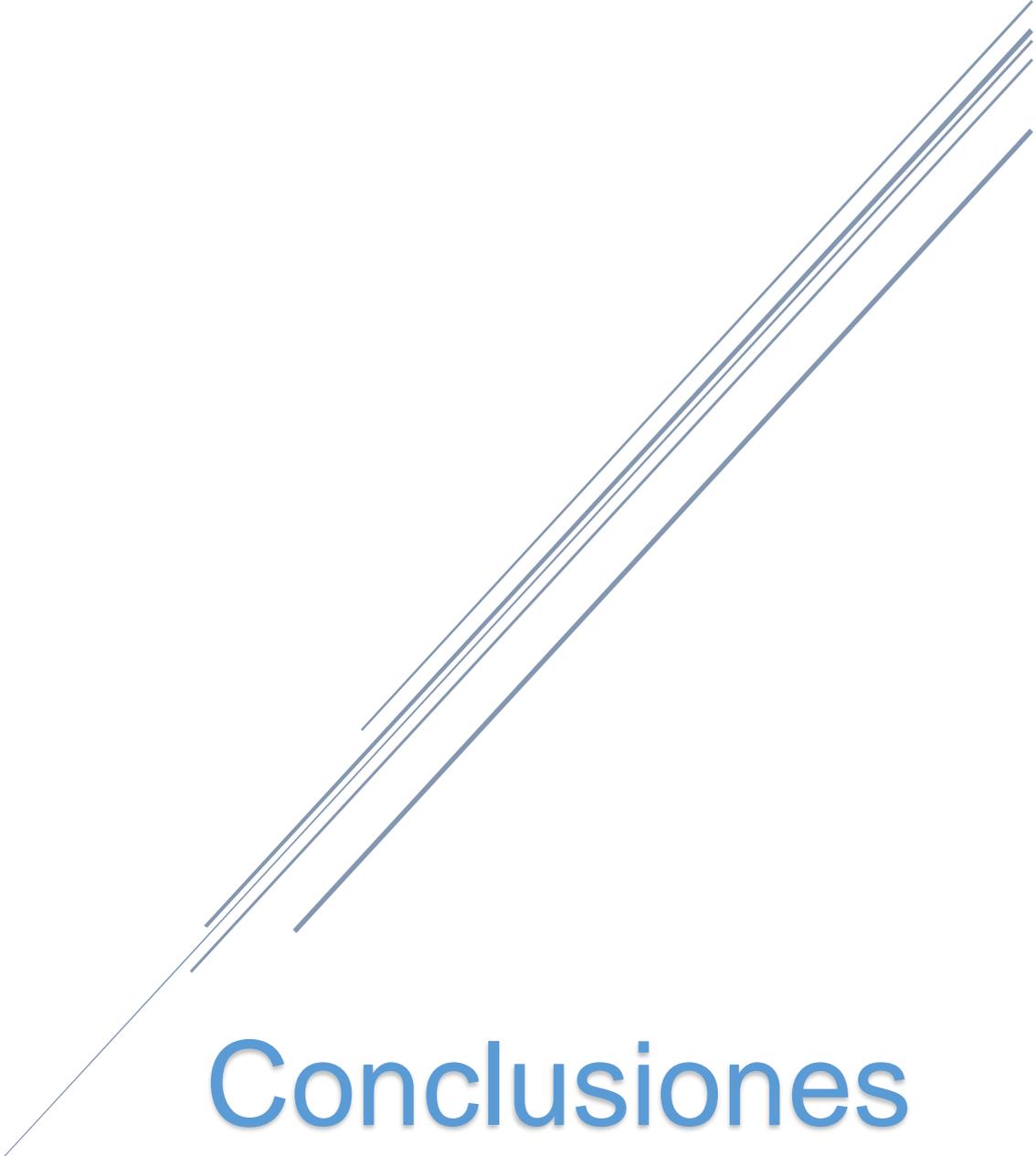
Una de las vías más importantes para mejorar la eficiencia operacional, y reducir las emisiones atmosféricas, la constituye el control y ajuste de la combustión para lograr operar con mínimo exceso de aire. Entre otros métodos se encuentran la recuperación de calor de los gases de salida y recuperación de condensado.

III.6. Evaluación del impacto ambiental.

La evaluación de impacto ambiental se realiza en base al cálculo de emisiones de CO₂ causadas por el consumo de combustible de la caldera en el tiempo de operación que se analiza. En este estudio se considera un tiempo de operación de siete meses entre mayo y noviembre, para un consumo total de 18 406 litros de diésel. Teniendo en cuenta el factor de emisiones para este combustible (2,79 kgCO₂/l) según la ecuación 2.22 se determina un impacto ambiental de 51,3 ton CO₂ emitidas al medio ambiente.

Conclusiones del capítulo III

1. Según los resultados obtenidos en la instalación evaluada, se determinó que la eficiencia energética es del 71,52% mediante el método directo y del 84,2% mediante el método indirecto. Estos valores están por debajo del rango de eficiencia bruta establecido en el libro "Generadores de Vapor" para las calderas pirotubulares, que se encuentra entre el 88% y el 92%. Esta discrepancia en los resultados puede indicar que la instalación evaluada no está alcanzando el nivel de eficiencia esperado para las calderas pirotubulares.
2. El análisis termográfico revela que el aislamiento térmico de la superficie en general se encuentra en estado técnico satisfactorio, aunque la zona del fondo de la caldera es desfavorable ya que se registran picos térmicos de hasta 247°C excediendo los valores permisibles para esta zona.
3. Los resultados de análisis ambiental estiman un total de 51,3 ton CO₂ emitidas al medio ambiente para el período de evaluación de la caldera.



Conclusiones

Conclusiones generales

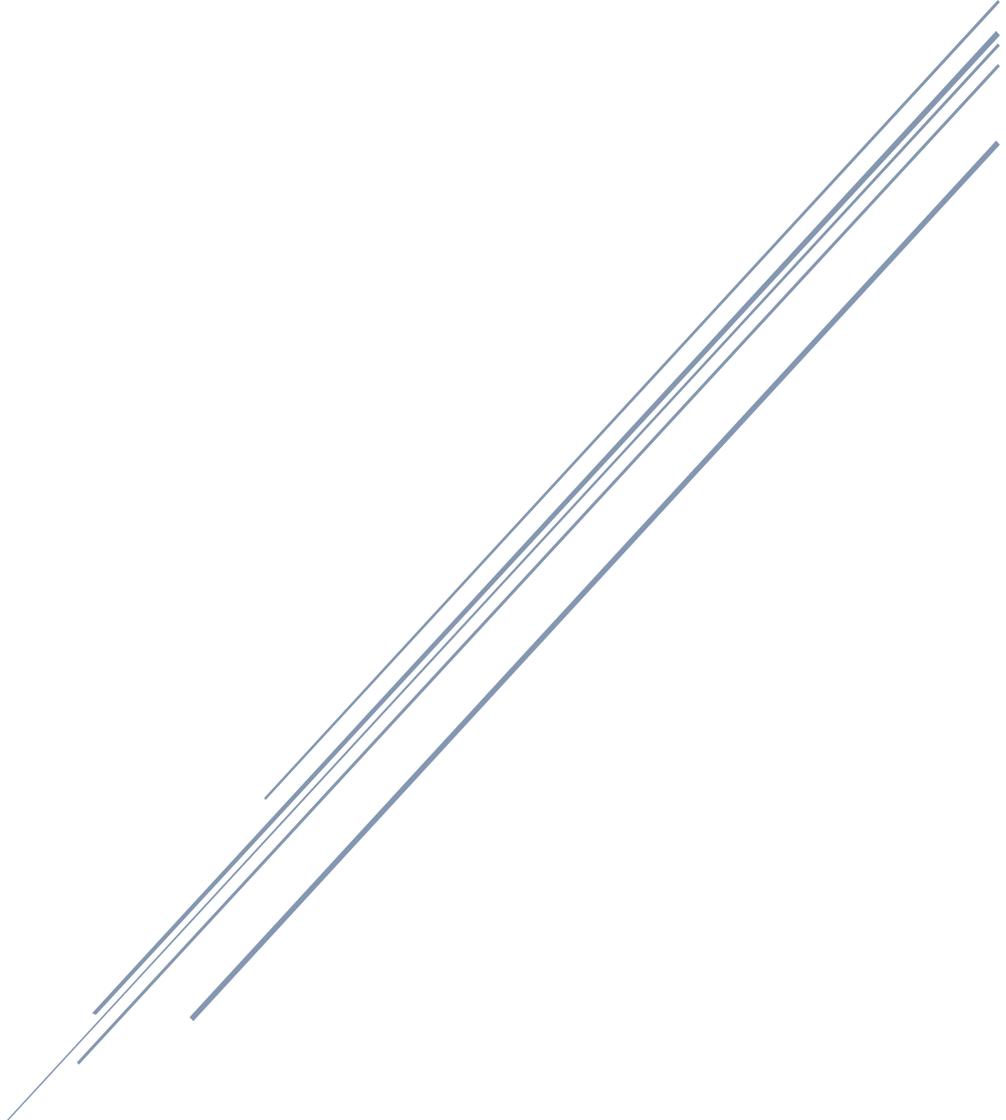
1. Los estudios energéticos en salas de calderas de vapor permiten identificar oportunidades de ahorro, son esenciales para optimizar el consumo de combustibles, reducir las emisiones de CO₂ y promover la eficiencia energética, lo que resulta en ahorros económicos a largo plazo, contribuyendo a la protección del medio ambiente.
2. La metodología de balance energético por el método directo determinó que la eficiencia energética de la instalación es del 71,52%. Sin embargo, este valor está por debajo del rango de eficiencia bruta establecido en el libro "Generadores de Vapor" para las calderas pirotubulares, que se encuentra entre el 88% y el 92%. Esta discrepancia en los resultados sugiere que la instalación no está alcanzando el nivel de eficiencia esperado para las calderas pirotubulares.
3. Con el método indirecto y el apoyo de la termografía, se determinó que la eficiencia energética de la instalación evaluada es del 84,2%. Este método tiene en cuenta las pérdidas de calor detectadas a través del análisis termográfico. Aunque este valor es más alto que el obtenido mediante el método directo, aún se encuentra por debajo del rango de eficiencia bruta establecido para las calderas pirotubulares.
4. Durante el período de evaluación de la caldera, se registraron emisiones de aproximadamente 51,3 toneladas de CO₂ al medio ambiente. Estas emisiones son resultado de la combustión y funcionamiento de la caldera.



Recomendaciones

Recomendaciones

1. Se propone a la dirección de la empresa la implementación de las medidas de ahorro energético para reducir emisiones y minimizar el impacto ambiental.
2. Generalizar este estudio de la eficiencia energética de calderas pirotubulares, en diferentes empresas con similares condiciones.



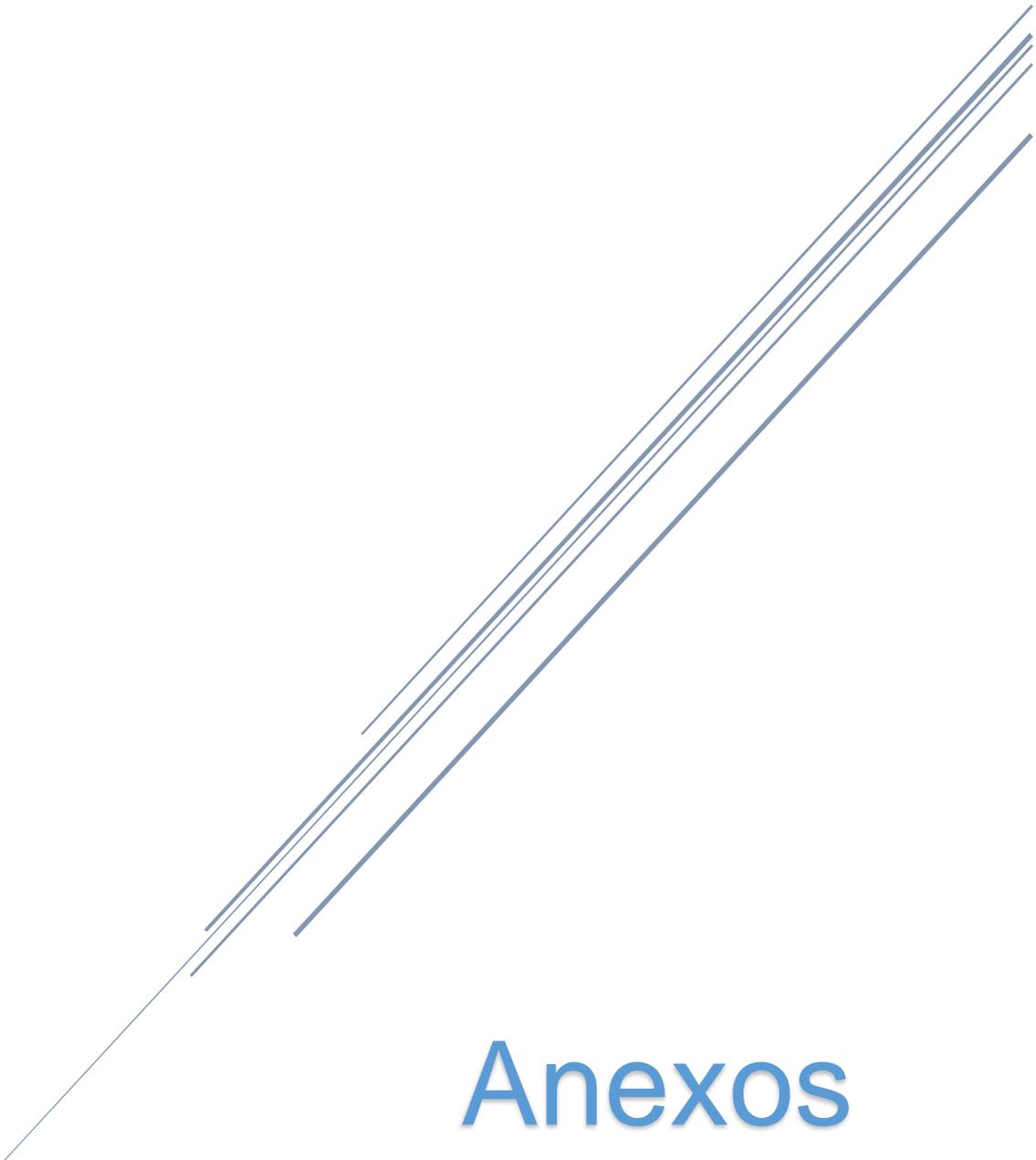
Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

- Bernal, H. R. G., Holguín, A. C. P., López, R. A., Sánchez, E. D., & Cardoso, G. O. (s. f.). *Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela.*
- Babcock & Wilcox. R B&W (s. f.). *Steam—Its Generation and Use.*<https://www.babcock.com/home/about/resources/steam-its-generation-and-use/>
- Cabrera Rodríguez, I. (2011). *Mejoramiento de la Eficiencia Energética en el Sistema de Generación de Vapor perteneciente al Combinado de Bebidas «Pedro Díaz Coello, Holguín.* (Tesis de Grado). Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica]. <http://repositorio.uho.edu.cu/xmlui/handle/uho/2798>
- Cansaya Quispe, N. A., & Huallata Apaza, P. (2015). Diseño de calderas pirotubulares de 15 BHP con parámetros de trabajo para altitudes superiores a 3800 M.S.N. *Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.* <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2894806>
- dice, E. L. M. (2020, noviembre 26). Partes de una Caldera. Componentes y Elementos Principales | Euroair. *Euroair Blog.* <https://www.euroair.es/blog/partes-de-una-caldera/>
- Esquerre Verástegui, J. E. (2016). Mejoramiento de una planta térmica mediante la implementación de caldera pirotubular vertical para uso industrial y docente. *Universidad Nacional del Callao.* <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/1641>
- Fuentes, O. F., & Lillo, S. M. (2022). Desarrollo de un simulador para la enseñanza de procesos térmicos en una caldera pirotubular de cuatro pasos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 26(2), 25–36.*
- Huamanchumo Calderón, A. Y., & Moreno Alvarez, C. A. (2022). *Mejora de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares mediante la regulación de sus parámetros de combustión para una empresa pesquera.* <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/99531>

- Ibañez Esteban, C. A. (s. f.). *Propuesta de mejoras para la actividad de los hornos y calderas de una refinería para reducir el impacto ambiental generado, estableciendo pautas para la implementación de un sistema de gestión ambiental*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/581462>
- Irigoin Garcia, I. (2022). *Mejoras energéticas para aumentar el rendimiento térmico de caldera de vapor Saturado en un hospital público, La Libertad*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/94389>
- Jiménez Borges, R., Iturralde Carrera, L. Á., Monteagudo Yanes, J. P., & Castillo Alvarez, Y. (2021). Pérdidas por radiación en generadores de vapor con el apoyo de la técnica termográfica. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(3), 262–270.
- Jiménez Borges, R., Madrigal Monzón, J. A., Lapidó Rodríguez, M. J., & Vidal Moya, D. A. (2016). Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor. *Ingeniería Energética*, 37(2), 135–143.
- Laverde, L. (2013). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (gei)*. https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/files/2013/07/Guia-practica-calcul-emisiones_rev_ES.pdf
- Panana Girio, A. E. (2015). *Balance térmico en una caldera pirotubular*. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/1002>
- Pérez-Sánchez, A., Tejeda, Y. F., & Cruz, R. G. de la. (2017). Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos 23 de Agosto, en Camagüey. *Revista Mutis*, 7(1), 7-19. <https://doi.org/10.21789/22561498.1198>
- Quiñones, R., & Iderte, J. (2021). *Análisis del balance térmico en el funcionamiento de la caldera pirotubular intesa (Modelo: PT-100) en el hospital ESSALUD III-Chimbote*. <http://publicaciones.usanpedro.edu.pe/handle/20.500.129076/20122>
- Rodríguez Arias, A. D., & Rosabal Ponce, L. B. (s. f.). *Librería Virtual Cuba | Comprar online Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión. Combustibles Sólidos*. <https://libreriavirtualcuba.com/teoria-y-practica-de-los-procesos-de-combustion-combustibles-solidos>

- Rubio González., A., & Borroto Nordelo, A. (2007). *Generadores de Vapor Funcionamiento y Explotación*. Universo Sur.
- Sen, A., & Al-Habaibeh, A. (2019). The design of a novel approach for the assessment of thermal insulation in buildings using infrared thermography and artificial intelligence. *International Journal of Design Engineering*, 9(1), 65-77. <https://doi.org/10.1504/IJDE.2019.104128>
- Torres Villalobos, J. E. (2022). *Análisis, para reducir las pérdidas de calor en la caldera acuotubular, agroindustrial Pomalca, (06), en* <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/104189>
- Yunus A, Ç., & Boles, M. A. (s. f.). *Termodinámica*. Biblioteca Hernán Malo González. <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/73815>



Anexos

Anexos

Anexo 1: Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire; [kJN/m³] (Fuente: Rodríguez, 2000).

ϑ [°C]	$(c\vartheta)_{RO_2}$	$(c\vartheta)_{CO_2}$	$(c\vartheta)_{N_2}$	$(c\vartheta)_{O_2}$	$(c\vartheta)_{H_2O}$	$(c\vartheta)_a$
100	170	170	130	131	150	134
200	358	356	260	266	304	268
300	558	558	393	405	462	405
400	772	772	528	548	628	548
500	995	995	665	700	795	690
600	1218	1224	804	846	966	834
700	1456	1463	945	1001	1148	987
800	1704	1704	1096	1160	1336	1136
900	1953	1953	1242	1314	1521	1296
1000	2200	2200	1390	1470	1720	1450
1100	2453	2453	1540	1639	1914	1606
1200	2712	2712	1704	1800	2124	1764
1300	2977	2977	1859	1963	2340	1937
1400	3234	3234	2016	2128	2562	2100
1500	3495	3495	2160	2295	2775	2265
1600	3744	3760	2320	2448	2992	2432
1700	4029	4029	2482	2618	3230	2584
1800	4302	4302	2646	2790	3456	2754
1900	4579	4560	2793	2964	3686	2926
2000	4860	4840	2960	3140	3920	3100
2100	5124	5103	3108	3297	4158	3255
2200	5390	5368	3300	3476	4400	3432

