



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Evaluación de la eficiencia de una caldera de vapor
reacondicionada mediante el método de cálculo indirecto para
determinar la necesidad de adquirir un nuevo equipo”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Presentada por:

Braulio Antonio Moncada Romero

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

PhD. Juan Manuel Peralta Jaramillo

Profesor de Materia

**MSc. Ernesto Rolando Martínez
Lozano**

Tutor de proyecto

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo BRAULIO ANTONIO MONCADA ROMERO acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 5 de septiembre del 2025.

Braulio Antonio Moncada
Romero

RESUMEN

El presente proyecto se centra en la evaluación de la factibilidad técnica de utilizar una caldera reacondicionada perteneciente a una universidad, con el propósito de determinar su viabilidad operativa en conjunto con un sistema turbina-generator. La motivación principal surge de la necesidad de optimizar recursos disponibles en la institución y al mismo tiempo, contar con un equipo que garantice un suministro de vapor confiable y eficiente para fines energéticos y académicos.

En una primera etapa, se realizó una revisión bibliográfica sobre calderas de vapor, y sus procesos de reacondicionamiento, así como las metodologías de evaluación de eficiencia y desempeño. Esto permitió establecer los parámetros técnicos más relevantes a considerar, tales como presión de operación, temperatura y caudal de vapor, potencia de la caldera, consumo de combustible y pérdidas energéticas.

El proyecto se estructuró en diversas fases metodológicas: (i) revisión bibliográfica, (ii) diseño de formatos para la recolección de datos experimentales, (iii) levantamiento de información mediante pruebas en condiciones reales de operación, (iv) determinación de los parámetros de desempeño de la caldera, (v) análisis de aptitud técnica para su integración con el sistema turbina-generator, y (vi) presentación de una ofertas referenciales de una nueva caldera en caso de que la existente no cumpla con los requerimientos establecidos.

Se determinó que la caldera reacondicionada no es apta para funcionar de manera integral con el sistema turbina-generator que se encuentra en el laboratorio de termofluidos, por lo que se recomienda su reposición por un nuevo equipo, cuyo costo estimado se encuentra alrededor de los \$13.000,00

TABLA DE CONTENIDO

1.1.	INTRODUCCIÓN	7
1.2.	ANTECEDENTES	8
1.3.	PROBLEMÁTICA	8
1.4.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
1.5.	OBJETIVOS	9
1.5.1.	Objetivo general	9
1.5.2.	Objetivos específicos	9
1.6.	ALCANCE.....	9
2.1.	METODOLOGÍA.....	10
2.2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.2.1.	Definición y propósito	11
2.2.2.	Funcionamiento general de una caldera	12
2.2.3.	Partes principales de una caldera de vapor	13
2.2.4.	Tipos de caldera	13
2.2.5.	Aplicaciones de calderas en distintas ingenierías	14
2.2.6.	Reacondicionamiento de calderas.....	15
2.2.7.	Parámetros de Operación.....	15
2.3.	ESTADO ACTUAL DE LA CALDERA REACONDICIONADA	23
2.4.	DATOS RECOLECTADOS	24
3.1.	RESULTADOS	27
3.2.	CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA	29
3.3.	TABLA DE PARÁMETROS DE CALDERA REACONDICIONADA.....	30
3.4.	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA	30
3.5.	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD FINANCIERA.....	32
4.1.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
4.1.1.	Conclusiones.....	33
4.1.2.	Recomendaciones	33
5.1.	BIBLIOGRAFÍA.....	35
6.1.	ANEXOS	38

INDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1. <i>Flujograma de proyecto</i>	10
GRÁFICO 2.2. <i>Componentes de caldera de vapor</i>	13
GRÁFICO 2.3 <i>Placa informativa caldera</i>	23
GRÁFICO 2.4. <i>Caldera</i>	24
GRÁFICO 3.1. <i>Planificación mantenimiento caldera reacondicionada</i>	31

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. <i>Datos recolectados bomba de agua de caldera reacondicionada</i>	25
TABLA 2.2 <i>Datos recolectados bomba de combustible de caldera reacondicionada</i>	26
TABLA 3.1 <i>Parámetros de caldera reacondicionada</i>	30
TABLA 3.2 <i>Tabla de costos de experimentación</i>	32

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

El uso de calderas industriales y comerciales es fundamental en múltiples sectores a nivel global, ya que estas unidades térmicas son esenciales para la generación de vapor y agua caliente utilizados en procesos industriales, generación de electricidad y climatización. Desde la Revolución Industrial, las calderas han evolucionado significativamente, incorporando tecnologías que mejoran su eficiencia energética y reducen su impacto ambiental. Actualmente, la optimización de su rendimiento es una prioridad para garantizar el uso racional de los recursos energéticos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, es así como en 2015 la distribución de la oferta total de energía primaria a nivel mundial estuvo compuesta de acuerdo con (Madejski & Zymelka, 2020) en un mayor porcentaje por petróleo en un 31.7%, carbón en 28.1% y gas natural en 21.6%.

En América Latina, el sector industrial depende en gran medida de calderas para procesos productivos en manufactura, alimentación, textil, química y generación de energía. En este contexto, la eficiencia energética de estos equipos es un factor clave para la competitividad de las empresas y la sostenibilidad ambiental. Ecuador no es ajeno a esta realidad, pues el uso de calderas es común en diversas industrias, así como en instituciones educativas y hospitales que requieren agua caliente y vapor para distintos procesos, sin embargo, en el país persiste el desafío de mejorar la eficiencia de estas unidades, debido a la antigüedad de algunos equipos y la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento y optimización energética. La caldera de vapor desempeña un papel fundamental en la conversión térmica de los residuos, permitiendo la generación de calor a partir del proceso de incineración (Pástor, Lengvarsky, Trebuna, & Carak, 2020), por lo que no solo las fallas del mecanismo de protección causan fallas en la caldera de vapor, sino también las altas tensiones residuales y la falta de variación de temperatura, que son causa principal de este tipo de fallo.

Alcanzar una mayor eficiencia en las calderas de vapor no solo es fundamental para optimizar el uso de la energía, sino también para reducir el impacto ambiental. Es esencial comprender la dinámica energética dentro de estos sistemas, ya que permite identificar oportunidades de mejora en el aprovechamiento del calor y en la reducción de pérdidas energéticas. Es de conocimiento global que los combustibles fósiles son cada vez más escasos y las preocupaciones ambientales continúan en aumento, por lo que es importante mejorar la eficiencia operativa de las calderas y sus equipos asociados para garantizar un uso más sostenible de los recursos energéticos (Elwardany, 2024).

La optimización de las calderas requiere la implementación de estrategias, como el uso de economizadores, precalentadores de aire y sistemas de recuperación de calor residual, que permiten maximizar la conversión energética y minimizar las emisiones contaminantes. Además, la integración de tecnologías de monitoreo y control facilita la detección de ineficiencias y el ajuste dinámico de parámetros operativos para mejorar el desempeño térmico, lo cual no solo reduce el consumo de combustible y costos operativos, sino que también contribuyen a mitigar el impacto ambiental hacia una energía más limpia y eficiente.

1.2. ANTECEDENTES

La caldera de vapor tema de estudio en este proyecto es un equipo con más de cuarenta años de antigüedad, adquirido originalmente por la institución para fines educativos en el campo de los sistemas térmicos. Durante sus primeros años de funcionamiento, estuvo instalada en el campus Las Peñas, donde fue utilizada para prácticas didácticas relacionadas con generación de vapor, transferencia de calor y eficiencia energética. No obstante, debido a fallas mecánicas y desgaste por uso, el equipo quedó inhabilitado durante un período de aproximadamente quince años en dicho campus.

Fue después de varios años de su traslado al campus Gustavo Galindo que surgió el interés institucional por reactivar el funcionamiento de la caldera, con el objetivo de recuperar su valor como herramienta pedagógica. En el año 2022 se llevó a cabo un proceso de reacondicionamiento que incluyó la sustitución del quemador original por uno de menor capacidad, dadas las limitaciones presupuestarias y la discontinuidad en la disponibilidad de repuestos originales. Además, por razones de seguridad, se procedió a deshabilitar varios tubos de fuego de la caldera que presentaban desgaste severo por incrustaciones internas, lo cual redujo de manera significativa la capacidad efectiva de generación de vapor del equipo.

Estas modificaciones, aunque necesarias, implicaron una alteración en las condiciones operativas originales de la caldera, limitando su capacidad. No obstante, su reacondicionamiento parcial ha permitido reintroducirla en el entorno académico como un caso práctico real para la evaluación del desempeño de sistemas térmicos antiguos, el análisis de eficiencia energética bajo condiciones modificadas, y la comprensión de los desafíos asociados al mantenimiento y operación de equipos envejecidos.

1.3. PROBLEMÁTICA

El reacondicionamiento parcial de una caldera de vapor con más de 40 años de antigüedad, si bien ha permitido su reactivación con fines educativos, plantea interrogantes técnicos fundamentales respecto a su desempeño operativo y su viabilidad como componente funcional dentro de un sistema de generación de energía que incluye una turbina y un generador. Las modificaciones realizadas durante el proceso de reacondicionamiento entre ellas, la sustitución del quemador por uno de menor capacidad y la deshabilitación de tubos de fuego debido al desgaste interno por incrustaciones, han cambiado las condiciones originales de diseño del equipo, afectando su capacidad térmica y su eficiencia en la generación de vapor.

En este contexto, surge la necesidad de determinar los parámetros operativos actuales de la caldera, tales como la presión de operación, la temperatura del vapor, el caudal másico generado y el rendimiento térmico bajo carga. Esta caracterización es crítica para evaluar si la caldera es capaz de generar vapor con las condiciones mínimas requeridas por la turbina-generador acoplado, considerando los requerimientos técnicos.

La falta de datos actualizados sobre el comportamiento térmico de la caldera, sumada a las limitaciones estructurales producto del desgaste y las modificaciones no originales, impide garantizar su compatibilidad y seguridad dentro de un sistema térmico acoplado. Por tanto, se hace imprescindible llevar a cabo una evaluación técnica integral del equipo, a fin de

establecer su aptitud operativa y tomar decisiones informadas sobre su uso, posibles riesgos, nuevas adaptaciones o la necesidad de adquirir un nuevo equipo para su integración eficiente y segura en el sistema generador.

1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, no se dispone de una caracterización técnica detallada de los parámetros operativos de la caldera de vapor reacondicionada, lo que impide determinar si el equipo puede generar vapor en las condiciones mínimas requeridas para su integración con el sistema turbina-generador existente.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Establecer los parámetros de operación de una caldera de vapor reacondicionada en una universidad mediante diferentes métodos evaluando su compatibilidad con el sistema turbina-generador

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico técnico del estado actual de la caldera reacondicionada, identificando los principales componentes y sistemas que influyen en su eficiencia energética.
- Evaluar la compatibilidad técnica de la caldera con el sistema turbina-generador, comparando los parámetros operativos obtenidos con los requerimientos mínimos de operación del conjunto turbina-generador.
- Recomendar alternativas de uso didáctico de la caldera reacondicionada acordes a su capacidad operativa en caso de no ser compatible.

1.6. ALCANCE

El proyecto tiene como alcance la evaluación técnica de una caldera de vapor reacondicionada, ubicada en una universidad y destinada a fines didácticos, mediante la determinación de sus parámetros operativos actuales utilizando diferentes métodos encontrados en libros. Con base en esta caracterización, se determinará si cumple con los requerimientos necesarios detallados en las fichas técnicas de los equipos que conforman el sistema turbina-generador disponible.

El estudio incluye la documentación de los parámetros de funcionamiento de la caldera reacondicionada y la emisión de recomendaciones técnicas. En caso de determinar que la caldera no es apta para integrarse al sistema turbina-generador, se presentará una oferta referencial de una nueva caldera, la cual contempla los requerimientos técnicos del sistema y servirá como guía para la toma de decisiones institucionales donde incluirá especificaciones, sin llegar a gestionar procesos de adquisición ni implementación. Adicionalmente, se propondrán alternativas de uso en función de su capacidad operativa actual, quedando a criterio de la universidad su asignación a otros espacios o actividades formativas.

CAPITULO 2

2.1. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolla mediante un enfoque sistemático orientado a determinar los parámetros actuales de operación de una caldera de vapor reacondicionada, con el objetivo de evaluar su compatibilidad con el sistema de generación (turbina-generator), su viabilidad técnica y económica frente a la adquisición de un equipo nuevo. Para ellos se llevaron a cabo las siguientes fases metodológicas:

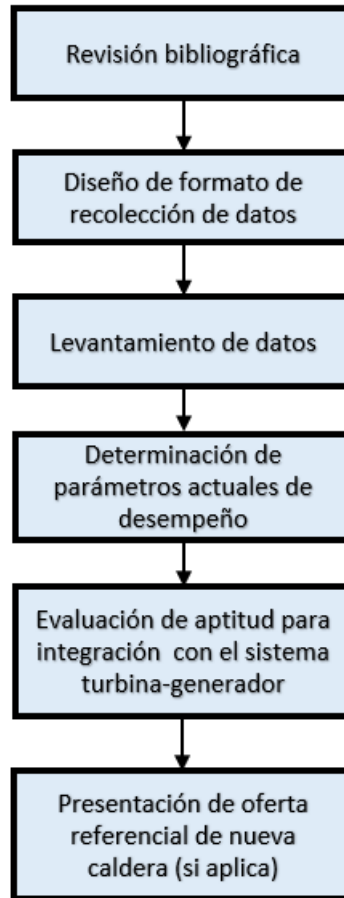


Gráfico 2.1. Flujograma de proyecto

Autor: Elaboración propia

Revisión bibliográfica

Se realiza análisis de literatura técnica aplicable a calderas de vapor, donde se identifica los métodos de evaluación de eficiencia y confiabilidad. Se determina los parámetros de diseño requeridos para la integración con sistemas de generación (turbina-generator).

Diseño de formato de recolección de datos

Se elabora fichas y plantillas que incluyen variables operativas y constructivas de la caldera como: presión de operación, temperatura del vapor, caudal másico, consumo de combustible, entre otros. De acuerdo con las normas de seguridad del laboratorio, la caldera no debe exceder de 4 Bar manométricos, puesto que puede incurrir en desperfectos.

Levantamiento de datos

Se realiza la medición y registro de variables en condiciones reales de operación.

Determinación de parámetros actuales de desempeño

Con los datos recolectados, se realizan los cálculos respectivos para determinar los parámetros actuales de funcionamiento de la caldera.

Evaluación de aptitud para integración con el sistema turbina-generador

Con la revisión bibliográfica y fichas técnicas de los equipos que conforman el sistema turbina-generador, se analiza la compatibilidad de estos y se identifican las limitaciones técnicas o riesgos de operación que comprometen la confiabilidad del conjunto.

Presentación de oferta referencial de nueva caldera (si aplica)

Corresponde a la selección técnica de una caldera que cumpla con los parámetros requeridos por el sistema, donde se presenta la oferta referencial como insumo para la toma de decisiones institucionales.

2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.2.1. Definición y propósito

Una caldera de vapor es un equipo térmico diseñado para generar vapor a partir del calentamiento de agua, mediante la combustión de un combustible (gas natural, fueloil, carbón o biomasa) o el uso de otra fuente de energía, como la eléctrica o el aprovechamiento del calor residual de procesos industriales (Maydana & Akbar, 2024). El principio básico de funcionamiento consiste en transferir energía térmica al agua contenida dentro de un sistema cerrado, elevando su temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición y transformándola en vapor, el cual puede ser saturado o sobrecalentado, dependiendo de las condiciones operativas y los requerimientos del proceso.

Este vapor generado cumple un papel esencial en una amplia gama de aplicaciones industriales. Entre las más comunes se encuentran los procesos de calentamiento y secado, la generación de electricidad mediante turbinas de vapor, la esterilización en el sector hospitalario, el accionamiento de equipos mecánicos y diversas operaciones unitarias en la industria química, alimentaria, farmacéutica, textil, entre otras. La versatilidad del vapor como medio de transferencia de energía lo convierte en una herramienta clave para asegurar la eficiencia, continuidad y control térmico en los procesos productivos.

Las calderas, por tanto, constituyen un componente crítico dentro de la infraestructura energética de múltiples instalaciones. Su presencia es indispensable en plantas industriales

de mediana y gran escala, en centrales térmicas de generación eléctrica, en refinerías, ingenios azucareros, sistemas de calefacción urbana (district heating), y en centros hospitalarios donde se requiere vapor en condiciones controladas de alta presión y temperatura para procesos sensibles. Además, su desempeño está directamente vinculado a la eficiencia global del sistema térmico, razón por la cual el monitoreo y evaluación de su eficiencia energética representa una actividad fundamental para la gestión operativa, el ahorro de combustible y la reducción de emisiones contaminantes.

2.2.2. Funcionamiento general de una caldera

El principio básico de funcionamiento de una caldera consiste en transferir calor desde una fuente externa hacia el agua contenida en su interior, elevando su temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición, y posteriormente transformándola en vapor (Maydana & Akbar, 2024). Este proceso ocurre dentro de un sistema cerrado, específicamente diseñado para soportar condiciones de presión y temperatura elevadas, garantizando tanto la eficiencia del intercambio térmico como la seguridad operativa del equipo.

El ciclo comienza con la alimentación de agua al sistema, la cual puede ser agua tratada o desmineralizada, según las características del proceso y los requisitos de calidad del vapor. Esta agua de alimentación es impulsada hacia el interior del cuerpo de la caldera mediante bombas, y en muchos casos pasa previamente por un economizador, donde recupera calor residual de los gases de combustión, mejorando así el rendimiento térmico global.

En calderas de combustión, el encendido del quemador marca el inicio del proceso de generación de calor, mediante la quema controlada del combustible. El calor liberado se transfiere a través de superficies de intercambio —tubos, haces tubulares o cámaras de combustión— hacia el agua, provocando un incremento progresivo de la temperatura. Cuando el agua alcanza su punto de ebullición correspondiente a la presión de operación, comienza la formación de vapor. Este vapor se acumula en la parte superior de la caldera, generalmente en un domo o tambor de vapor, donde se separa del agua restante y puede extraerse para su utilización en procesos externos.

En configuraciones más complejas, como las calderas acuotubulares o pirotubulares, este principio se mantiene, pero varía la disposición de los elementos internos para adaptarse a diferentes demandas térmicas y de presión. Además, algunos sistemas incorporan sobre calentadores, recalentadores o sistemas de control automático que optimizan la calidad del vapor producido, regulan las condiciones de operación y mejoran la eficiencia energética del conjunto (Elwardany, 2024).

El control de parámetros como la presión, la temperatura, el nivel de agua y el exceso de aire en la combustión es fundamental para el funcionamiento seguro y eficiente de la caldera. Cualquier desviación puede afectar el rendimiento o incluso representar un riesgo para el personal y los equipos, por lo que el diseño y operación de estos sistemas deben cumplir estrictamente con normativas técnicas y de seguridad vigentes.

2.2.3. Partes principales de una caldera de vapor

Las calderas de vapor están compuestas por diversos elementos esenciales para su funcionamiento y seguridad. Entre las partes más relevantes se encuentran:

Hogar o cámara de combustión: Lugar donde se quema el combustible.

Tubo de humos o tubos de agua: Dependiendo del tipo de caldera, el calor se transfiere al agua ya sea a través de tubos por donde circulan gases calientes o agua.

Tambor de vapor (drum): En calderas de tipo acuotubular, donde se acumula el vapor generado.

Economizador: Precalienta el agua de alimentación utilizando los gases de escape.

Supercalentador: Eleva la temperatura del vapor por encima de su punto de saturación.

Sistemas de control y seguridad: Válvulas de seguridad, medidores de presión, nivel de agua y sistemas de purga.

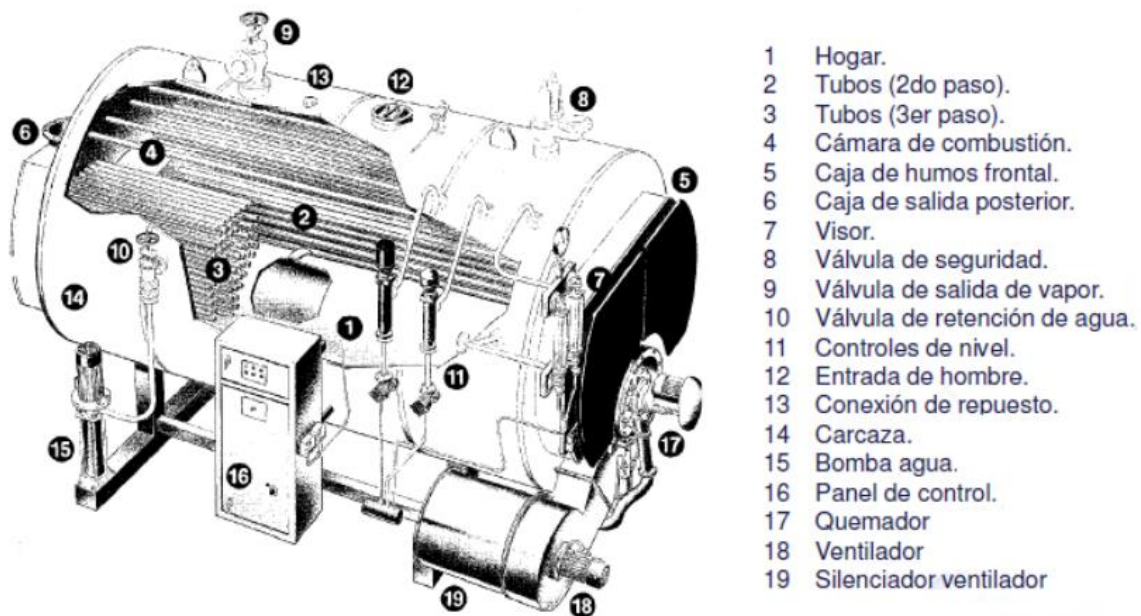


Gráfico 2.2.3 Componentes de caldera de vapor

Autor: (SoloEjemplos.com, 2025)

2.2.4. Tipos de caldera

Las calderas se pueden clasificar de diversas maneras, pero una de las principales divisiones se basa en:

Disposición de los tubos

- **Calderas pirotubulares (tubos de humo):** Los gases calientes generados en la combustión circulan a través de tubos rodeados de agua. Son comunes en aplicaciones de baja a media presión (hasta 40 bar) con una eficiencia promedio entre el 70 - 80 %, tienen una operación simple y bajo costo inicial.
- **Calderas acuotubulares (de tubos de agua):** El agua circula dentro de los tubos que son calentados externamente por gases de combustión (Sathish, y otros, 2021). Estas calderas son más eficientes (90 -95 %) y se utilizan para generar vapor a alta presión (superior a 40 bar).

Tipo de combustible

- **Calderas de combustibles fósiles:** Gas Natural, diésel, fuelóleo, carbón.
- **Calderas de Biomasa:** Utilizan residuos orgánicos (astillas, cascaras, bagazo).
- **Calderas eléctricas:** Resistencia o electrodos.
- **Calderas de recuperación:** Aprovechan gases residuales de turbinas o Motores.

Presión de operación

- **Calderas de baja presión (< 1.5 bar):** Uso en lavanderías, pequeños procesos térmicos.
- **Calderas de media presión (1.5 – 40 bar):** Procesos industriales comunes.
- **Calderas de alta presión (> 40 bar):** Plantas de cogeneración o generación eléctrica.

Diseño de circulación del agua:

- **Circulación natural:** funciona por diferencia de densidades, proceso más simple pero menos eficiente en grandes potencias.
- **Circulación forzada:** El agua es impulsada mediante una bomba, presenta una mejora en el intercambio térmico y mayor eficiencia en altas potencias.

Configuración física

- **Horizontales:** Más comunes utilizadas en calderas pirotubulares.
- **Verticales:** Ocupan menor espacio, usadas en instalaciones compactas.
- **Modulares:** Pequeñas calderas en paralelo operan acorde a la demanda.

2.2.5. Aplicaciones de calderas en distintas ingenierías

Las calderas de vapor son equipos fundamentales en diversas ramas de la ingeniería debido a su capacidad para generar y transferir energía térmica en forma de vapor. Su uso es esencial en la generación de energía, procesos industriales, calefacción y aplicaciones especializadas. Entre las diferentes aplicaciones se encuentran:

Ingeniería mecánica y térmica: En generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas, análisis de eficiencia y optimización (Elwardany, 2024).

Ingeniería química: Procesos de calentamiento, destilación, reacción y producción de vapor para procesos industriales (V., 2002).

Ingeniería industrial: Procesos de calentamiento, destilación, reacción y producción de vapor para procesos industriales (R & M, 2025).

Ingeniería civil: Sistemas de calefacción centralizada y tratamiento de agua para edificios e infraestructuras (M, O, & D, 2023).

Ingeniería ambiental: Optimización de eficiencia energética y reducción de emisiones en plantas de vapor (Madejski & Zymelka, 2020).

Ingeniería de control: Automatización y control avanzado de calderas para mejorar seguridad y eficiencia (F, y otros, 2025).

2.2.6. Reacondicionamiento de calderas.

El reacondicionamiento de calderas consiste en la restauración o modernización de sus componentes para prolongar su vida útil y mejora su eficiencia operativa. Esto puede incluir el reemplazo de quemadores, instalación de economizadores, limpieza de superficies de transferencia térmica, modernización de controles o aislamiento térmico (Elwardany, 2024). Este proceso permite reducir costos de inversión respecto a la adquisición de una nueva caldera, aunque deber evaluarse rigurosamente su desempeño posterior, especialmente en lo que respecta a su eficiencia térmica.

2.2.7. Parámetros de Operación.

1. Presión de operación (P_{vapor}):

La presión de operación es un parámetro crítico que influye directamente en la eficiencia, seguridad y viabilidad de los sistemas industriales y de generación de energía. Su adecuada gestión y control son esenciales para optimizar el rendimiento, reducir costos y minimizar riesgos operativos (AbduKareem, 2018). Esta presión se mide comúnmente en bar o PSI y afecta tanto a la temperatura del vapor como a la eficiencia térmica del sistema.

2. Temperatura del vapor (T_{vapor}):

La temperatura del vapor afecta a la eficiencia y flexibilidad operativa, donde el control preciso es esencial para evitar daños en los equipos y optimizar el rendimiento energético. Entre los factores que afectan la temperatura del vapor se encuentra la carga y variación del combustible, el diseño, material y geometría interna (Zhu, y otros, 2023). Las calderas pueden utilizar vapor saturado o sobrecalentado, la cual es medida en °C. Cuanto más caliente el vapor (si es sobrecalentado), mayor su contenido energético.

3. Caudal de vapor ($\dot{m}_{vapor}$):

El caudal de vapor en calderas es un parámetro que depende de variables como la presión, temperatura, consumo de combustible y carga térmica. Su medición y monitoreo mediante modelos matemáticos y sistemas en línea son esenciales para optimizar la eficiencia operativa (Mohammed, Hussein, & Numan, 2021). Este indicador, expresado en Kilogramos

por hora (Kg/h) o toneladas por hora (t/h), determina la capacidad de producción de la caldera y está directamente relacionado con la entalpía del vapor generado.

4. Consumo de combustible ($\dot{m}_{combustible}$)

El consumo de combustible en calderas de vapor está determinado por factores como el tipo y calidad del combustible, la relación aire-combustible, y el control de las condiciones operativas. Una gestión adecuada de estos elementos permite optimizar la eficiencia térmica, reduciendo significativamente el consumo y los costos operativos. El gas natural destaca por ofrecer un menor consumo específico y mayor eficiencia en comparación con otros combustibles (DOSA, KOVACS, & ANDRAS, 2024). Las unidades de medida varían según el combustible: metros cúbicos normales por hora (Nm³/h) para gas natural, kilogramos por hora (kg/h) para biomasa y carbón, y litros por hora (L/h) para fuel oil. Este parámetro es fundamental para calcular la eficiencia térmica del sistema.

5. Poder Calorífico del Combustible (PCI o PCS)

El poder calorífico es una propiedad termodinámica que indica la cantidad de energía que un combustible puede liberar durante su combustión. Este parámetro influye directamente en la generación de vapor y en la eficiencia global del sistema. Combustibles con mayor poder calorífico permiten una mayor generación de energía y mejor eficiencia, aunque la composición y mezcla del combustible también influyen significativamente (Igbagbon, Orhorho, & Erokare, 2024). La selección adecuada del combustible y el ajuste de los parámetros operativos son esenciales para maximizar la eficiencia y minimizar las pérdidas energéticas. Las unidades de medida pueden ser: kcal/kg, MJ/kg o kWh/kg. Existen dos tipos de poder calorífico

PCI (Poder Calorífico Inferior): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de un combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado. Este valor es relevante en sistemas donde el vapor no se condensa, como en motores de combustión interna. Se mide en kilocalorías por kilogramo (kcal/kg), mega julios por kilogramo (MJ/kg) o kilovatios hora por kilogramo (kWh/kg)

PCS (Poder Calorífico Superior): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de un combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado, incluyendo el calor de condensación del vapor. Este valor es importante en aplicaciones donde el calor de condensación puede ser aprovechado, como en calderas de alta eficiencia. Se mide en unidades como megajulios por kilogramo (MJ/kg) o kilocalorías por gramo (kcal/g)

6. Temperatura de entrada del agua de alimentación (T_{agua})

La temperatura de entrada del agua de alimentación en calderas de vapor es fundamental para maximizar la eficiencia, reducir el consumo de combustible y minimizar emisiones. Su control y optimización, mediante precalentadores y recuperación de energía, son estrategias clave para mejorar el desempeño y la sostenibilidad de las plantas de vapor. Un

aumento excesivo puede reducir la producción neta de una planta (Yong-Chu & Seung-Jae, 2024). La unidad de medida es °C.

7. Temperatura de gases de escape (T_{humos})

La temperatura de los gases de escape es un indicador fundamental para estimar la eficiencia y economía de una planta térmica, donde las temperaturas elevadas aumentan las pérdidas de calor y reducen la eficiencia de la caldera, incrementando el consumo de energía y los costos operativos (Chao, Ke, Yongzhen, Zhitong, & Yulie, 2017), su unidad de medida es °C. El control y optimización permiten reducir pérdidas, ahorrar combustible y minimizar el impacto ambiental.

8. Exceso de aire (EA)

Es la cantidad de aire suministrado al proceso de combustión que excede la cantidad teóricamente necesaria para quemar completamente el combustible (combustión estequiométrica) (Bosh Industrie Kessel, 2025). Este aire adicional se introduce para asegurar una combustión completa y evitar la formación de monóxido de carbono. Excesos muy altos reducen la eficiencia; muy bajos causan combustión incompleta.

9. Producción de energía útil (vapor)

Corresponde al calor contenido en el vapor generado.

Para vapor saturado:

$$Q_{vapor} = \dot{m}_v * (h_{vapor} - h_{agua}) \quad (EC.1)$$

Donde:

- $\dot{m}_v$ = caudal de vapor (kg/h).
- h_{vapor} = entalpía del vapor saturado a la presión de operación (kcal/kg).
- h_{agua} = entalpía del agua de alimentación (kcal/kg), según su temperatura.

Se determina mediante el uso de tablas de vapor los valores de entalpía según la presión y temperatura (interpolación).

10. Potencia de Caldero

BHP (Boiler Horsepower) es una unidad de medida tradicional que indica la capacidad de generación de vapor de una caldera. Por definición 1 BHP equivale a 34.5 lb/h de vapor a 212°F (100°C) y presión atmosférica.

Para poder calcular la potencia del caldero se utiliza la siguiente formula:

$$BHP = \frac{\text{Caudal de vapor} \left(\frac{kg}{h} \right)}{15.9} \quad (EC.2)$$

$$BHP = \frac{\text{Caudal de vapor} \left(\frac{lb}{h} \right)}{35}$$

Si se conoce la energía útil generada se utiliza lo siguiente:

$$BHP = \frac{Q_{vapor} \left(\frac{Kcal}{h} \right)}{8400}$$

Requerimientos para obtener los BHP:

- Caudal de vapor generado $\dot{m}_v$: en $\frac{kg}{h}$ o $\frac{lb}{h}$
- Presión de operación: para determinar si el vapor es saturado o sobrecalentado.
- Temperatura de agua de alimentación: Para obtener su entalpía.
- Caudalímetro de vapor o balance de energía sino se tiene medición directa.

11. Calidad de vapor

La calidad de vapor es un parámetro fundamental en la operación de calderas de vapor, ya que describe el porcentaje en masa de vapor seco en una mezcla de vapor y agua líquida. Se expresa como un valor entre 0 y 1 (o en porcentaje, del 0% al 100%). Una calidad de vapor de 1.0 (100%) significa vapor seco saturado, mientras que un valor inferior indica la presencia de gotas de agua en suspensión (vapor húmedo).

La calidad de vapor se puede determinar teóricamente o medir directamente, dependiendo del contexto:

a) Cálculo a partir de entalpías (método termodinámico):

$$X = \frac{h_{mezcla} - h_f}{h_{fg}} \quad (EC.3)$$

Donde:

- x : Calidad del vapor (sin unidades)
- h_{mezcla} : Entalpía específica de la mezcla (kcal/kg)
- h_f : Entalpía del agua saturada (kcal/kg)
- h_{fg} : Entalpía de vaporización (kcal/kg), es decir, la diferencia entre la entalpía del vapor saturado y del agua líquida a la misma presión.

b) Medición directa:

Se puede usar un calorímetro de vapor (como el calorímetro separador o de estrangulamiento), que mide directamente el contenido de humedad.

Equipos más avanzados como analizadores de vapor por ultrasonido o sonda de dispersión de niebla también permiten conocer la calidad de vapor en línea.

Relación de la calidad de vapor con la eficiencia energética

La calidad del vapor influye directamente en la eficiencia del proceso térmico y el aprovechamiento de la energía:

- Vapor seco ($x \approx 1.0$) transfiere calor de forma eficiente sin generar condensación prematura, lo cual maximiza el rendimiento térmico en los intercambiadores, turbinas o procesos.
- Vapor húmedo ($x < 1.0$) reduce la eficiencia energética porque parte del calor latente no está disponible (queda atrapado como agua líquida), y además causa problemas mecánicos como corrosión, erosión de válvulas, reducción de capacidad calorífica útil y pérdidas por purga.

Desde el punto de vista de la caldera, si se genera vapor con baja calidad:

- El sistema puede estar operando con un nivel de agua inadecuado, sobrecargando el domo de vapor.
- Puede haber mala separación de fases en el domo.
- El diseño de los separadores de humedad puede estar comprometido, o puede haber sobrecarga térmica.

Buenas prácticas para mejorar la calidad de vapor

- Mantener niveles adecuados de agua en la caldera.
- Instalar separadores de humedad y secadores de vapor (si aplica).
- Controlar la velocidad de generación de vapor para evitar el arrastre de agua.
- Usar tratamiento adecuado del agua para evitar formación de espuma.
- Realizar mantenimiento periódico a válvulas, domo de vapor y sistemas de control.

En resumen, la calidad del vapor es clave para garantizar un funcionamiento eficiente, seguro y rentable de una caldera. No solo afecta la energía útil entregada, sino que también impacta el estado de conservación del sistema y el consumo de combustible.

12. Eficiencia

La eficiencia en las calderas de vapor constituye un aspecto clave para garantizar la sostenibilidad y competitividad en plantas de generación de energía y en procesos industriales (Elwardany, 2024). Incrementar la eficiencia significa minimizar las pérdidas energéticas, optimizar el proceso de combustión y aprovechar de manera efectiva el calor residual, donde no solo reduce costos operativos, sino que también disminuye el impacto ambiental asociado.

Entre los factores que influyen en la eficiencia se encuentran los siguientes:

- Pérdidas de calor: Las más significativas se producen en la zona de combustión y en las superficies de transferencia térmica (Mohamed, I.; Hossieny, A.; Akrb, O.; Abdelmoez, M, 2024). Entre ellas destacan las pérdidas por gases de escape y por radiación.
- Condiciones de operación: El rendimiento de la caldera depende de la carga de trabajo, el tipo de combustible y la relación aire-combustible. Tanto el exceso de aire como la temperatura de los gases de salida inciden directamente en la eficiencia (Madejski & Zymelka, 2020).
- Diseño y materiales: Las calderas diseñadas para trabajar a alta presión y fabricadas con materiales avanzados contribuyen a reducir la destrucción de exergía y favorecen un mayor aprovechamiento energético (Wang, H.; Jin, D.; Liu, X.; Zhang, C, 2022).

Método de cálculo de eficiencia de calderas.

La eficiencia térmica de una caldera es un indicador clave del desempeño energético del equipo, ya que permite determinar qué proporción del calor generado por la combustión del combustible es efectivamente transferido al agua para producir vapor útil. La evaluación de esta eficiencia puede realizarse mediante dos enfoques reconocidos internacionalmente: el método directo y el método indirecto, ambos normalizados por organismos como la British Standard Institution (BS845), la ASME PTC 4.1, y en algunos casos por la normativa ISO 50001 en sistemas energéticos.

Método directo o del rendimiento térmico

El método directo consiste en una evaluación simple y rápida de la eficiencia térmica, basada en el cociente entre la energía útil generada (vapor producido) y la energía suministrada al sistema (energía del combustible). Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia } (\eta_{\text{directa}}) = \frac{\text{Calor útil generado por el vapor}}{\text{Calor aportado por el combustible}} \times 100 \quad (\text{EC.4})$$

Donde:

El calor útil generado se calcula a partir del flujo masico de vapor y la entalpia del vapor menos la entalpia del agua de alimentación.

Calor de combustible se determina a partir del poder calorífico del combustible (PCI o PCS) y el consumo horario.

Ventajas:

- Rápido de aplicar
- Requiere pocos datos medibles
- Útil para controles rutinarios

Limitaciones:

- No permite identificar las fuentes específicas de pérdida de energía.
- Su precisión depende fuertemente de la calidad de la medición del caudal de vapor y combustible.

Método indirecto o balance de pérdidas.

El método indirecto, también llamado método de balance de energía o método de pérdidas calcula la eficiencia determinando todas las formas de pérdida térmica en la caldera. La Σ eficiencia se obtiene como el complemento a 100% de la suma de estas pérdidas.

$$\text{Eficiencia } (\eta_{\text{indirecta}}) = 100\% - (\Sigma \text{ Pérdidas térmicas}) \quad (\text{EC.5})$$

$$\text{Eficiencia } (\eta_{\text{indirecta}}) = 100\% - (q_{\text{gases}} + q_{\text{inquemados}} + q_{\text{radiación}} + q_{\text{humedad comb.}} + q_{\text{aire humedo}} + q_{\text{purgas}}) \quad (\text{EC.6})$$

Las principales pérdidas que se consideran en este método son:

- Pérdidas por gases de escape (alta temperatura de gases, exceso de aire).
- Pérdidas por combustión incompleta (presencia de CO, hollín, partículas).
- Pérdidas por radiación y convección (calor disipado al entorno).
- Pérdidas por humedad en el combustible.
- Pérdidas por humedad del aire.
- Pérdidas por purgas (eliminación de sales y lodos)

Ventajas:

- Permite un diagnóstico detallado de los factores que afectan la eficiencia.
- Ideal para análisis de mejora energética y estudios de reacondicionamiento.
- Proporciona base sólida para implementar acciones correctivas o de mantenimiento.

Limitaciones:

- Requiere instrumentación especializada (analizadores de gases, termopares, etc.).
- Demanda mayor tiempo y precisión en las mediciones.
- Puede ser complejo en calderas antiguas con limitaciones de acceso a los datos.

Pérdida por gases de escape (Diésel)

$$\text{Pérdida gases escape}(\%) \approx \frac{M_{\text{gases}} * C_{p,\text{gases}} * (t_{\text{humos}} - t_{\text{amb}})}{PCI} * 100 \quad (\text{EC.7})$$

Donde:

t_{humos} = temperatura de los gases de escape (°C)

t_{amb} = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

M_{gases} = Masa de gases por kg de combustible

$Cp_{gases} \approx 1.05 \text{ kJ/kg}$ (para gases de combustión del diésel)

PCI = poder calorífico inferior efectivo del diésel

Alternativamente, si se conoce el contenido de CO_2 en gases:

$$\text{Pérdida (\%)} \approx \frac{(t_{humos} - t_{amb}) * 0.68}{\% \text{CO}_2} \quad (\text{EC.8})$$

Esta fórmula empírica es útil cuando se tiene un analizador de gases de combustión. Un valor típico de referencia para diésel es 12–13% CO_2 con buena combustión.

Consideraciones específicas para diésel:

- $PCI = 42500 \text{ KJ/kg}$.
- Gases de escape típicos contienen: CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , trazas de CO o NOx .
- Exceso de aire ideal: 15–20%, aunque sistemas antiguos trabajan con más (hasta 40%).

Selección del método de eficiencia de caldera

Para la evaluación de la eficiencia térmica se ha decidido aplicar el método directo, considerando que el objetivo del análisis se centra exclusivamente en la eficiencia de la caldera, sin incluir el resto del sistema de generación y distribución de vapor. Esta elección se fundamenta tanto en criterios técnicos como en las condiciones reales del laboratorio donde se llevarán a cabo las mediciones. El método directo, también conocido como método del rendimiento útil, se basa en la relación entre la energía útil aprovechada en forma de vapor generado y la energía suministrada al sistema por el combustible. Su aplicación resulta adecuada cuando se cuenta con información básica de operación, como el flujo de vapor, las condiciones de entrada y salida del agua y el consumo de combustible.

Adicionalmente, el laboratorio en el que se ejecutarán las pruebas no dispone de todos los equipos de medición necesarios para realizar un análisis detallado según el método indirecto, el cual requiere cuantificar diversas pérdidas térmicas tales como gases de combustión, convección, radiación, etc. (Megawati, Hurun'in, & Roziqin, 2023). En este contexto, el método directo representa una alternativa viable, confiable y suficientemente precisa para determinar la eficiencia de la caldera. De hecho, múltiples experiencias industriales indican que la diferencia porcentual entre los resultados obtenidos por ambos

métodos no suele ser significativa, manteniéndose generalmente dentro de un margen del 2 al 3% (Megawati, Hurun'in, & Roziqin, 2023).

2.3. ESTADO ACTUAL DE LA CALDERA REACONDICIONADA

Tal como se indica en el informe de mantenimiento de la caldera realizado en junio del 2023 por parte del personal técnico encargado del área (ver anexo A); en el año 2022 se decidió habilitar la planta de vapor que por 15 años estuvo fuera de servicio, no se le había realizado mantenimiento alguno durante este periodo motivo por el cual se desconocía el estado de operatividad de sus componentes.

Se coordinó la habilitación de equipos por etapas, la caldera fue el primer equipo en ser habilitado mediante un personal externo mismo que realizó pruebas a los componentes de la caldera y notando las siguientes novedades:

- Fugas de vapor en todo el sistema de tuberías, válvulas y medidores de nivel de agua lo que indicaba desgaste de empaques y aislamientos.
- Suciedad acumulada en quemador.
- Fugas en tuberías de humo de caldera.
- Incrustaciones de minerales en paredes de hogar y tuberías.
- Refractario desgastado.
- Planta de tratamiento de agua deshabilitada.
- Tubos de vidrio del medidor de la calidad de vapor rotos.

En el anexo B, se encuentra imágenes de las novedades encontradas en el equipo. Una vez realizado el mantenimiento correctivo a la caldera el contratista indica las siguientes novedades:

- 3 tubos de humo sellados de un total de 65.
- Requiere un quemador nuevo, el cual fue adquirido en el 2024.
- Planta de tratamiento de agua pendiente de habilitar.

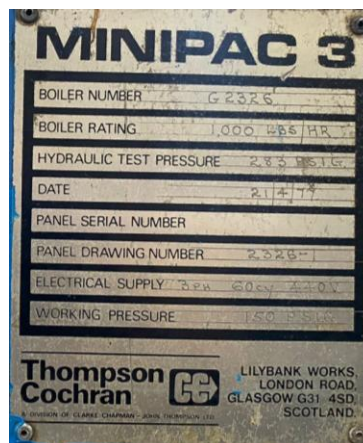


Gráfico 2.3 Placa informativa caldera

Autor: Elaboración propia



Gráfico 2.3 Caldera

Autor: Elaboración propia

Posterior a la lectura de los mantenimientos correctivos y preventivos realizados se procedió a inspeccionar la máquina y sus componentes previo al arranque y posterior toma de datos, esto con el objetivo de prevenir cualquier tipo de falla o lectura errónea.

Se tiene 4 elementos los cuales requieren de mantenimiento, en coordinación con el personal del laboratorio y pasantes se realiza el respectivo desmontaje, limpieza, verificación de su estado, reemplazo de partes y montaje.

Mediante un informe de mantenimiento realizado por el personal de mantenimiento se detalla los equipos reparados:

- **Medidor de calidad de vapor:** Presenta fuga de vapor en sus elementos de unión, el visor se encontraba en mal estado (roto), se procede a reemplazar el visor incluyendo 2 repuestos adicionales, se removi6 el 6xido y se reemplazaron los elementos de uni6n (acoples, nudos, etc.)
- **Medidor de flujo de vapor:** El equipo presentaba una obstrucci6n en su sistema por lo cual se requiri6 un desmontaje y limpieza de sus tuberías y accesorios, finalmente requiri6 una calibraci6n quedando operativo.
- **Válvula de purga:** Presenta fractura en su eje principal la cual no permitía el cierre correcto produciendo perdidas de energía mediante fugas de vapor en la parte inferior de la caldera, se realiz6 el reemplazo de la válvula, bridas y elementos de ajuste debido al desgaste y oxido quedando operativa.
- **Manguera para combustible:** Presenta desgaste en su superficie en general por el tipo de trabajo, se procede a reemplazarla.

Una vez realizados los mantenimientos de los equipos, fugas eliminadas y calibraci6n de estos se procede a la toma de datos.

2.4. DATOS RECOLECTADOS

En la tabla 2.1 y 2.2 se presentan los datos operativos recolectados de la bomba de agua y de combustible durante la evaluaci6n de la caldera de vapor, en condiciones reales de

funcionamiento. Estos registros incluyen parámetros térmicos y de consumo energético que permiten caracterizar el desempeño actual del equipo.

BOMBA DE AGUA						
inicio: 10:37	delta t	tiempo (S)	volumen inicial (L)	volumen final (L)	delta v (L)	Temperatura vapor de salida (°C)
t. encendido 1	00:50,1	50,1	86	127	41	
t entre enc. 1	14:51	891	0	0	0	145
t. encendido 2	00:50,0	50	127	169	42	
t. entre enc. 2	15:25	925	0	0	0	140
t. encendido 3	00:56,8	56,8	169	211	42	
t. entre enc. 3	14:42	882	0	0	0	140
t. encendido 4	0:52	52	211	249	38	
t entre enc. 4	14:42	882	0	0	0	141
t. encendido 5	0:52	52	249	294	45	
t. entre enc. 5	15:32	932	0	0	0	140
t. encendido 6	00:57,7	57,71	294	336	42	
t. entre enc. 6	15:08	908	0	0	0	140
t. encendido 7	00:53,5	53,5	336	375	39	
t entre enc. 7	13:52	832	0	0	0	140
t. encendido 8	00:38,3	38,3	375	415	40	
t. entre enc. 8	15:46	946	0	0	0	142
t. encendido 9	00:56,7	56,7	415	456	41	
t. entre enc. 9	13:44	824	0	0	0	141
t. encendido 10	00:54,6	54,6	456	497	41	
t entre enc. 10	14:51	891	0	0	0	140
t. encendido 11	1:01	61	497	539	42	
t entre enc. 11	16:02	962	0	0	0	140
t. encendido 12	00:58,1	58,1	539	586	47	
t entre enc. 12	15:09	909	0	0	0	141
t. encendido 13	00:55,4	55,4	586	624	38	
t entre enc. 13	15:07	907	0	0	0	140
t. encendido 14	00:58,7	58,7	624	667	43	
t entre enc. 14	16:08	968	0	0	0	140
t. encendido 15	00:56,9	56,7	667	708	41	
t entre enc. 15	14:22	862	0	0	0	140
t. encendido 16	00:57,7	57,7	708	751	43	
t entre enc. 16	15:23	923	0	0	0	140

Fuente: Elaboración propia

bomba de combustible						
on	off	delta t (S)	volumen inicial (L)	volumen final (L)	delta v (L)	Temperatura gases de escape (°C)
10:05	10:15	600	10	7,5	2,5	118
10:15	10:25	600	7,5	5,1	2,4	135
10:25	10:36	600	5,1	2,65	2,45	138
10:36	10:44	508	2,65	0,75	1,9	140
10:55	11:05	600	REPOSICIÓN DE NIVEL DE DIESEL			
11:05	11:11	401	10,25	8,65	1,6	140
11:17	11:24	392	8,65	7,05	1,6	139
11:30	11:37	382	7,05	5,55	1,5	140
11:54	12:00	360	5,55	4,15	1,4	140
12:05	12:11	371	4,15	2,75	1,4	140

Fuente: Elaboración propia

La información obtenida constituye la base para el análisis técnico-económico orientado a determinar los parámetros de operación de la caldera, la cual se detalla en el capítulo 3. Este diagnóstico es esencial para establecer la viabilidad de su reacondicionamiento o en su defecto, justificar la adquisición de un nuevo equipo que cumpla con los requerimientos del sistema turbina-generator.

CAPÍTULO 3

3.1. RESULTADOS

A partir de la tabla de datos, se calcularon los siguientes parámetros de operación de la caldera.

1. Presión de operación (P_{vapor}):

La presión de operación fue tomada periódicamente durante la prueba.

$$P_{vapor} = 3.5 \text{ Bar}$$

2. Temperatura del vapor (T_{vapor}):

La temperatura del vapor fue medida con un termómetro marca Rototherm con un valor promedio de 141 °C.

3. Poder Calorífico del Combustible (PCI o PCS)

PCI (Poder Calorífico Inferior): 42,500 KJ/Kg

PCS (Poder Calorífico Superior): 45,500 KJ/Kg

4. Temperatura de entrada del agua de alimentación (T_{agua})

La temperatura de entrada del agua en promedio 27 °C.

5. Temperatura de gases de escape (T_{humos})

La temperatura mediante termómetro registró un valor de 140 °C.

6. Calidad de vapor (X)

a) *Cálculo a partir de entalpías (método termodinámico):*

$$x_1 = \frac{h_{mezcla} - h_f}{h_{fg}}$$

$$x_1 = 0.978$$

b) *Medición directa*

Para este análisis se utiliza un instrumento llamado medidor de calidad de vapor que separa la humedad del vapor y el vapor seco para posteriormente ser pesado y obtener los respectivos porcentajes

$$x_2 = \frac{m_{vapor\ seco}}{m_{vapor\ seco} + m_{humedad}}$$

$$x_2 = 0.949$$

Entonces:

$$X = x_1 * x_2$$

$$X = 0.928$$

7. Caudal de vapor ($\dot{m}_{vapor}$):

Se realizó la medición de forma indirecta considerando los tiempos de consumo y la cantidad de agua que ingresaba como reposición al caldero, se consideró la calidad de vapor para obtener una medición apropiada.

$$\dot{m}_{vapor} = \left(\frac{v_{final} - v_{inicial}}{tiempo_{encendido} + tiempo_{entre encendidos}} \right) * X$$

$$\dot{m}_{vapor} = 145.33 \left(\frac{Kg}{h} \right)$$

8. Consumo de combustible ($\dot{m}_{combustible}$)

El consumo de combustible se realizó de forma indirecta relacionando el consumo en litros de Diesel en determinados intervalos de tiempo.

$$\dot{m}_{combustible} = \left(\frac{v_{final} - v_{inicial}}{\Delta t (s)} \right)$$

$$\dot{m}_{combustible} = 12 \left(\frac{Kg}{h} \right)$$

9. Energía útil (vapor)

$$Q_{vapor} = \dot{m}_v * (h_{vapor} - h_{agua})$$

$$Q_{vapor} = 380,479.826 \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

10. Energía suministrada

$$Q_{diesel} = \dot{m}_{combustible} * PCI$$

$$Q_{diesel} = 511,739.244 \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

11. Potencia de Caldero

$$Potencia\ de\ caldero = \frac{Caudal\ de\ vapor \left(\frac{kg}{h} \right)}{15.9}$$

$$Potencia\ de\ caldero = 9.128\ BHP$$

12. Eficiencia

$$\eta = \frac{Energía\ útil}{Energía\ suministrada} * 100$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_{vapor} * [h_f + X * h_{fg} - h_{f\ entrada}]}{\dot{m}_{combustible} * PCI} * 100$$

$$\eta = 74.35\ \%$$

3.2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA

a) Pérdidas por gases de escape

Asumo 20% exceso aire, gas seco.

$$Pérdida\ gases\ escape(\%) \approx \frac{M_{gases} * C_p * (t_{humos} - t_{amb})}{PCI} * 100$$

$$Pérdida\ gases\ escape\ (\%) \approx 4.12\ \%$$

b) Pérdida por humedad en combustible

Asumo $w_f = 0.1\%$ humedad en Diesel.

$$Pérdida\ comb.(\%) = \frac{w_f [C_{p,agua}(100 - t_f) + h_{fg,100} + C_{p,vapor}(t_{gas} - 100)]}{PCI} * 100$$

$$Pérdida\ comb.(\%) = 0.0062\ \%$$

c) Pérdida por humedad del aire

$$E = m_w \cdot c_{p,v} \cdot \Delta T$$

$$E \approx 67.66\ kJ/kg\ diesel$$

Pérdida relativa respecto al PCI

$$Pérdida\ aire\ (\%) = \frac{E}{PCI} * 100$$

$$Pérdida\ aire\ (\%) = 0.1592\ \%$$

d) Pérdida por radiación y convección

$$\% \text{ Pérdida}_{rad+conv} = \frac{Q_{rad+conv}}{\dot{m}_{combustible} * PCI} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{rad+conv} = \frac{9681.4 \frac{KJ}{h}}{511739.24 \frac{KJ}{h}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{rad+conv} = 2.00 \%$$

e) Pérdida por sólidos disueltos en el agua

$$\% \text{ Pérdida}_{sólidos disueltos} = \frac{Q_{purga}}{\dot{m}_{combustible} * PCI} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{sólidos disueltos} = \frac{2294.92 \frac{KJ}{h}}{511739.24 \frac{KJ}{h}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{sólidos disueltos} = 0.448 \%$$

3.3. TABLA DE PARÁMETROS DE CALDERA REACONDICIONADA

Tabla 3.3.

Parámetros de caldera reacondicionada.

MARCA	MINIPAC 3
SERIAL	G 2326
PRESIÓN VAPOR (BAR)	4
TEMPERATURA DE VAPOR (°C)	141
CONSUMO DE VAPOR (KG/H)	145.13
POTENCIA CALDERO (BHP)	9.128
$\dot{m}$ DIÉSEL (KG/H)	12
EFICIENCIA (%)	74.35

Fuente: Elaboración propia

3.4. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA

Durante el desarrollo del proyecto se planificó la toma de datos experimentales de la caldera reacondicionada en el laboratorio de la universidad, con el objetivo de determinar sus parámetros de operación y evaluar su factibilidad de integración al sistema turbina-generador. Sin embargo, el proceso se vio afectado por una serie de factores externos y técnicos que condicionaron el avance de la investigación.

En primer lugar, entre septiembre y diciembre 2024 se produjeron apagones eléctricos a nivel nacional, con interrupciones de hasta 12 horas diarias. Esta situación obligó al uso intensivo del sistema de respaldo a diésel, agotador el combustible destinado a la caldera.

Posteriormente, la reposición de combustible experimentó retrasos administrativos que prolongaron la inactividad del equipo.

A partir de enero del 2025, la caldera presentó desperfectos eléctricos que la mantuvieron fuera de servicio hasta mayo 2025, lo que limitó severamente la continuidad en la recolección de datos. Durante este periodo solo fue posible realizar dos jornadas de medición experimental, antes que se produjera una nueva falla que requirió la ejecución de un plan de mantenimiento, el cual se extendió hasta julio del 2025, reanudando las pruebas a partir de agosto del 2025. Estos inconvenientes reflejan la vulnerabilidad operativa de equipos reacondicionado y evidencian la importancia de contar con una planificación robusta de mantenimiento, suministro de combustible y respaldo energético.

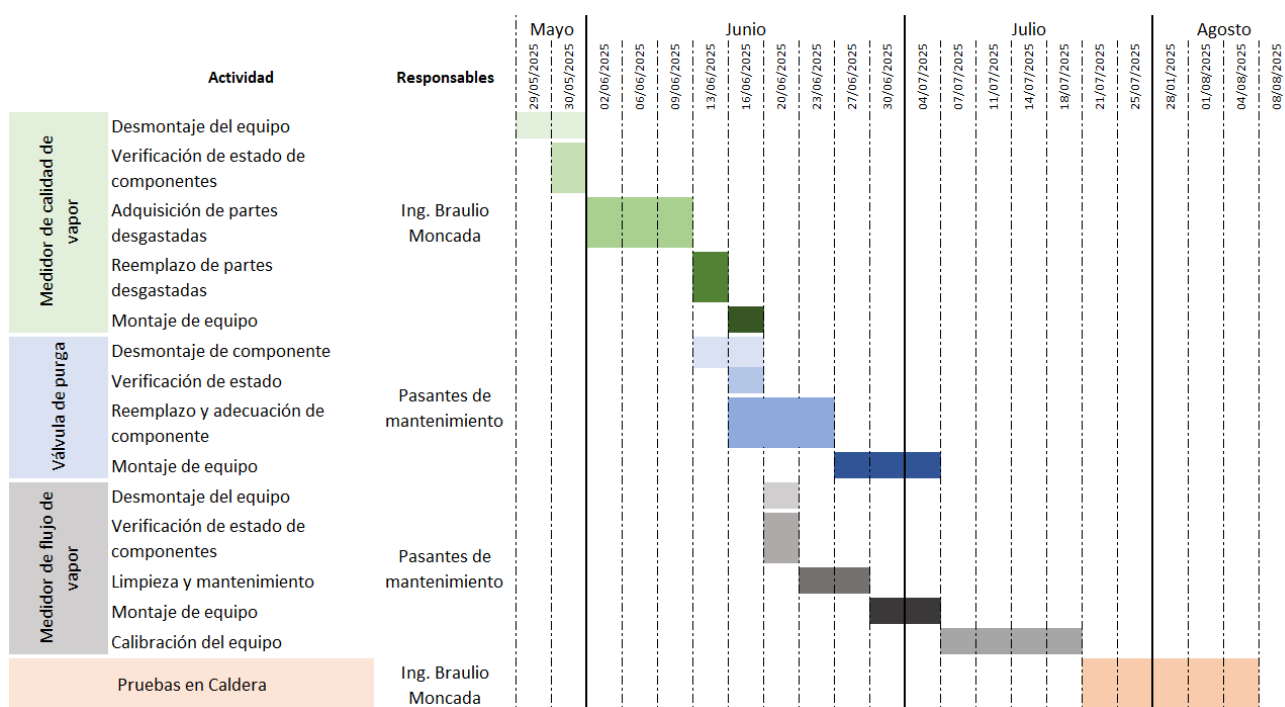


Gráfico 3.4 Planificación mantenimiento caldera reacondicionada

Fuente: Elaboración propia

3.5. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD FINANCIERA

Los insumos y repuestos fueron adquiridos de manera local, donde los costos asociados se detallan en la tabla 3.2.

Tabla 3.5

Tabla de costos de experimentación

Concepto	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Costo hora/máquina (40USD/hora)	40 horas	40,00	1.600,00
Repuestos de medidor de calidad de vapor: tubos de vidrio, acoples, nudos, teflón, cuchillas.	Tubos vidrio: 2 Acoples: 4 Nudos: 1 Teflón: 2 Cuchillas: 1 set	60,00	60,00
Mecanizado de piezas para medidor de calidad	1 hora	20,00	20,00
Repuesto de manguera de alimentación de combustible	1	10,00	10,00
Mano de obra instalación (40USD/día)	2 días	40,00	80,00
TOTAL			1.770,00

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.1. Conclusiones

- Se efectuó el análisis de desempeño de la caldera reacondicionada, determinándose los parámetros operativos actuales. Los resultados muestran una potencia de 9,12 BHP, un consumo de vapor de 145,13 kg/h, un consumo de combustible de 12 kg/h, una calidad de vapor de 0,928 y una eficiencia térmica global de 74,35 %.
- Las pérdidas energéticas, se calcularon en términos porcentuales, obteniéndose un valor del 6,73 %. El porcentaje restante corresponde a pérdidas no cuantificadas, atribuidas a la falta de instrumentación específica para su medición. Dentro de las pérdidas determinadas, las pérdidas por gases de escape representan el 4,12 %, mientras que las pérdidas por radiación y convección ascienden al 2 %, siendo estos los principales factores de ineficiencia térmica identificados.
- Se contrastaron los parámetros reales de operación de la caldera MINIPAC 3 con los establecidos en el manual de diseño de la turbina UNIDAD DINAMOMÉTRICA C/D 3000, la cual requiere un rango de presión de vapor entre 6,9 y 9,66 bar manométricos. Bajo la configuración actual, la caldera no puede operar a dichas presiones, ya que por razones de seguridad su límite máximo de operación es de 4 bar manométricos, lo que imposibilita su acoplamiento directo a la turbina en las condiciones de fábrica.
- A pesar de la no compatibilidad actual de la caldera reacondicionada con el sistema turbina-generator, el equipo mantiene capacidad de generación de vapor en rangos seguros y controlados, lo que permite su utilización en diferentes ingenierías como: ingeniería en alimentos, ingeniería química, ingeniería civil e ingeniería en materiales.
- Debido a que la caldera no es apta para funcionar en conjunto con el sistema turbina-generator, se solicitó 2 cotizaciones, local y extranjera, las cuales se detallan en el anexo E.

4.1.2. Recomendaciones

- Ajuste de la turbina

De acuerdo con el manual de diseño de la turbina UNIDAD DINAMOMÉTRICA C/D 3000, cuando se opera a presiones inferiores a 6,9 bar manométricos es

necesario realizar ajustes específicos, tales como modificar la carrera del regulador y aumentar la apertura de la válvula reguladora, con el fin de permitir un mayor caudal de vapor hacia la cámara de expansión.

- Prueba hidrostática de la caldera reacondicionada

Se recomienda efectuar una prueba hidrostática para evaluar la integridad estructural de la caldera y verificar si es factible operar a presiones superiores al límite actual de 4 bar manométricos. En caso de confirmarse la posibilidad de alcanzar una presión de operación mayor a 6,9 bar manométricos, la caldera podría acoplarse a la turbina sin necesidad de realizar modificaciones adicionales en sus componentes.

- Documentación pedagógica

Elaborar guías de laboratorio que permitan replicar prácticas, con formatos de registro de datos y análisis.

- Reducción de pérdidas por gases de escape

Para disminuir las pérdidas de energía asociadas a los gases de combustión, se sugiere implementar un programa de limpieza periódica de los tubos de humo, con el objetivo de eliminar incrustaciones en las superficies de transferencia térmica. Adicionalmente, se recomienda la puesta en marcha de la planta de tratamiento de agua de alimentación, lo cual contribuirá a reducir la formación de depósitos, mejorar la eficiencia de transferencia de calor y prolongar la vida útil del equipo.

- Minimización de pérdidas por radiación y convección

Con el propósito de mitigar las pérdidas térmicas por radiación y convección, se recomienda instalar aislante térmico en los tramos de tuberías y accesorios que actualmente no cuentan con protección. Para los componentes que requieren mantenimiento frecuente, se sugiere emplear aislamiento desmontable, ya sea mediante colchonetas térmicas o cajas con cierres rápidos, lo que facilitará las labores de inspección y reparación, permitiendo posteriormente reinstalar el aislamiento sin dificultad.

5.1. BIBLIOGRAFÍA

- AbduKareem, M. A. (2018). Experimental Investigation and Mathematical Modelling of pressure response for Steam Generator. *International Journal of Engineering & Technology*. doi:<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.19.28077>
- ASME. (s.f.). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*.
- Bosh Industrie Kessel. (2025). *www.boiler-planning.com*. Obtenido de https://www.boiler-planning.com/es/eficiencia/aumento-de-la-ficiencia-de-combustion/aumento-de-la-eficiencia-del-sistema-de-quemadores.html?utm_source=chatgpt.com
- Chao, L., Ke, L., Yongzhen, W., Zhitong, M., & Yulie, G. (2017). The Effect Analysis of Thermal Efficiency and Optimal Design for Boiler System. *The 8th International Conference on Applied Energy*. doi:doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.629
- Cleaver Brooks. (2010). *Boiler Efficiency Guide*. Thomasville.
- DOSA, J., KOVACS, J., & ANDRAS, J. (2024). The Influence of Fuel Composition on the Operating Characteristics of the Steam Boiler. *Muszaki Tudományok Közlemények*. doi:<https://doi.org/10.33894/mtk-2024.20.02>
- Elwardany, M. (2024). Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and exergy analysis: A review. *Process Safety and Environmental Protection* 184. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.102>
- F, R., S, A., H, E., S, T., A, M., j, L., & D, M. (2025). Cogeneration system's energy performance improvement by using P-graph and advanced process control. *Chemical Product and Process Modeling*, 20. doi: <https://doi.org/10.1515/cppm-2024-0071>
- Igbagbon, E. J., Orhororo, E. K., & Erokare, T. E. (2024). Performance Evaluation of a Developed Miniature Steam Boiler Using Different Samples of Wood as Fuel for Steam Generation. *Journal of Advanced Industrial Technology and Application*. doi:<https://doi.org/10.30880/jaita.2024.05.01.004>
- M, Z., O, P., & D, M. (2023). Evaluation of the cost-effectiveness of solutions to improve the efficiency of atmospheric deaeration in boiler plants. *Safety and Reliability of Power Industry*. doi:<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2022-15-4-240-246>
- Madejski, P., & Zymelka, P. (2020). Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling. *Energy* 197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117221>
- Maydana, A., & Akbar, A. (2024). Boosting Boiler Efficiency Through Strategic Interventions. *Procedia of Engineering and Life Science Vol. 7*.

- Megawati, E., Hurun'in, & Roziqin, C. (2023). EFISIENSI BOILER DI PT.XYZ DENGAN METODE LANGSUNG DAN TIDAK LANGSUNG. *Journal Engineering Research and Application*, 1-5. doi:ISSN : 2809-459X
- Mohamed, I.; Hossieny, A.; Akrb, O.; Abdelmoez, M. (2024). Energy Efficiency and Environmental Impact Assessment of Steam Power Plant Boiler. *Assiut University Bulletin for Environmental*. doi:<https://doi.org/10.21608/auber.2024.290268.1086>
- Mohammed, R. H., Hussein, H. A., & Numan, A. H. (2021). An Experimental Investigation of the Dynamic Effects in Upper Drum Boiler Under Steam Mass Flow Rate Variation. *Engineering and Technology Journal*. doi:<http://doi.org/10.30684/etj.v39i9.1998>
- north american manufacturing co. (s.f.). *north american combustion handbook*. Cleveland.
- Pástor, M., Lengvarsky, P., Trebuna, F., & Carak, P. (2020). Prediction of failures in steam boiler using quantification of residual stresses. *Engineering Failure Analysis* 118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104808>
- R, M., & M, S. (2025). Improving Boiler Performance with Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA). *Engineering Headway*, 13. doi: <https://doi.org/10.4028/p-AHgZB3>
- Sathish, T., Mohanavel, V., Afzal, A., Arunkumar, M., Ravichandran, M., Khan, S. A., . . . Asif, M. (2021). Advanced of steam generation process in water tube boiler using Taguchi design of experiments. *Case studies in thermal engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101247>
- SoloEjemplos.com. (2025). www.soloejemplos.com. Obtenido de https://www.soloejemplos.com/ejemplo-de-tipos-de-calderas/#google_vignette
- The Babcock & Wilcox Company. (s.f.). *Steam Its Generation and Use*. New York.
- UNE. (s.f.). *Norma UNE-EN 12952 / UNE-EN 12953*.
- V., G. (2002). Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design. *Applications and calculations*.
- Wang, H.; Jin, D.; Liu, X.; Zhang, C. (2022). Analytical and numerical investigations on the high temperature upgrading solution of subcritical boilers. *Applied Thermal Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117628>
- Yong-Chu, J., & Seung-Jae, M. (2024). Performance Comparison of 500 MW Coal-Fired Thermal Power Plants with Final Feedwater Temperatures. *Applied Sciences*. doi:<https://doi.org/10.3390/app14166999>

Zhu, H., Tan, P., He, Z., Ma, L., Zhang, C., Fang, Q., & Chen, G. (2023). Revealing steam temperature characteristics for a double-reheat unit under coal calorific value variation. *Energy* 2023. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128530>

6.1. ANEXOS

ANEXO A

Cálculos de parámetros de caldera de vapor reacondicionada.

Calidad de vapor:

Método termodinámico

Húmedo

$$P_{abs} = 4.3 \text{ bar}$$

$$T_{sat} = 147.9^{\circ}\text{C}$$

$$h_f = 639.36 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 2082.4 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Sobrecalentado

$$P_{abs} = 14.7 + 2.4 = 17.1 \text{ psia}$$

$$T = 106^{\circ}\text{C}$$

$$h_{mezcla} = 2676.0 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$x_1 = \frac{h_{mezcla} - h_f}{h_{fg}}$$

$$x_1 = \frac{2676 - 639.36}{2082.4}$$

$$x_1 = 0.978$$

Método directo (estrangulamiento)

$$m_{humedad} = 127 \text{ gr}$$

$$m_{vapor} = 2369 \text{ gr}$$

$$m_{total} = m_{humedad} + m_{vapor} = 2496 \text{ gr}$$

$$x_2 = \frac{m_{vapor}}{m_{total}} = \frac{2369 \text{ gr}}{2496 \text{ gr}} = 0.95$$

$$X = x_1 * x_2$$

$$X = 0.928$$

Flujo másico de vapor

$$\dot{m}_{vapor} = \left(\frac{v_{final} - v_{inicial}}{tiempo_{encendido} + tiempo_{entre encendidos}} \right) * X$$

$$\dot{m}_{vapor} = \left(\frac{163 \text{ l}}{3788.9 \text{ seg}} \right) * 0.928 * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 145.33 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right)$$

Flujo masico de combustible

$$\dot{m}_{combustible} = \left(\frac{v_{final} - v_{inicial}}{\text{delta } t \text{ (s)}} \right)$$

$$\dot{m}_{combustible} = \left(\frac{7.5 \text{ l}}{1906 \text{ s}} \right) * 0.850 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{combustible} = 12 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right)$$

Eficiencia térmica

$$\eta = \frac{\dot{m}_{vapor} * [h_f + X * h_{fg} - h_{f \text{ entrada}}]}{\dot{m}_{combustible} * PCI} * 100$$

$$\eta = \frac{380479.826}{511739.244} * 100$$

$$\eta = 74.35 \%$$

Perdida por gases de escape:

Combustible: diésel (aprox. $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$).

Exceso de aire = 20 %.

T. gas = 140 °C

T. amb = 29.1 °C

$\Delta T = 110.9 \text{ °K}$

$c_{p, \text{gas}} \approx 1.05 \text{ kJ/kg}$.

PCI Diesel= 42,500 kJ/kg

Masa de gases por kg de combustible (con 20 % EA)

A partir de la estequiometría para $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$:

Gases secos ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2$ en exceso): $M_{\text{gaseco}} \approx 15.03 \text{ kg/kg combustible}$.

Pérdida por gases de escape (calor sensible)

$$q_g = \frac{M_g * c_{p*} \Delta T}{PCI} * 100$$

Base gas seco (criterio ASME más común):

$$q_g = \frac{15.03 * 1.05 * 110.9}{42500} * 100 = 4.12 \%$$

Pérdida por humedad en combustible:

$$Pérdida \text{ comb. } (\%) = \frac{w_f [C_{p,agua} (100 - t_f) + h_{fg,100} + C_{p,vapor} (t_{gas} - 100)]}{PCI} * 100$$

$$Pérdida \text{ comb. } (\%) = \frac{0.001 [4.186 (100 - 29.1) + 2257 + 2.08 (140 - 100)]}{42500} * 100$$

$$Pérdida \text{ comb. } (\%) = 0.0062 \%$$

Pérdida de humedad en el aire:

RH = **73.2%**

EA = **20 %**

T. amb = 29.1 °C

T. gas = 140 °C

PCI Diesel=42 500 kJ/kg

Supuestos usados

$$m_{\text{aire,estequiométrico}} = 14.6599 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$

$$m_{\text{aire}} = m_{\text{aire,estequiométrico}} * (1 + EA)$$

$$m_{\text{aire}} = 14.6599 * 1.20 = 17.5919 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$

Fórmula de Tetens para presión de vapor de saturación a 29.1°C.

cp, vapor=1.86 kJ/kg (vapor de agua).
 $\Delta T = T_{\text{gas}} - T_{\text{amb}} = 140 - 29.1 = 110.9 \text{ K}$

Cálculo intermedio (valores)

- P. sat (29.1°C) $\approx 4028.5 \text{ Pa}$.
- $P_v = RH \cdot p_{\text{sat}} \approx 2948.85 \text{ Pa}$.
- Razón de mezcla (ω) $= 0.622 \cdot \left(\frac{p_v}{p_{\text{atm}} - p_v} \right) \approx 0.0186446 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg aire seco}$.
- Masa de vapor en el aire por kg combustible:
 $m_w = \omega \cdot m_{\text{aire}} \approx 0.0186446 \times 17.5919 \approx 0.3280 \text{ kg H}_2\text{O/kg fuel}$.

Energía requerida para calentar esa humedad

$$E = m_w \cdot c_{p,v} \cdot \Delta T$$

$$E = 0.3280 \cdot 1.86 \cdot 110.9 \approx 67.66 \text{ kJ/kg fuel}$$

Pérdida relativa respecto al PCI

$$q_{h, \text{air}} = \frac{E}{PCI} * 100$$

$$q_{h, \text{air}} = \frac{67.6566 \text{ kJ/kg}}{42500 \text{ kJ/kg}} * 100 = 0.1592 \%$$

Perdida por radiación y convección

$$T_{s,i} = 137^\circ\text{C}$$

$$T_a = 29.1^\circ\text{C}$$

Área superficial

$$A_{\text{Total}} = A_{\text{tapa}} + A_{\text{quemador}} + A_{ac1} + A_{ac2} + A_{ac3} + A_{ac4} + A_{ac5} + A_{ac6} + A_{ac7} + A_{ac8} + A_{ac9}$$

$$A_{\text{Total}} = 0.25 + 0.20 + 0.16 + 0.16 + 0.15 + 0.13 + 0.14 + 0.08 + 0.08 + 0.08 + 0.08$$

$$A_{\text{Total}} = 1.51 \text{ m}^2$$

$$h_{c,i} = 1.32(T_{s,i} - T_a)^{\frac{1}{3}} = 6.32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$q_{conv} = h_{c,i}(T_{s,i} - T_a) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{conv} = 6.32 \frac{W}{m^2 \circ K} (410 - 302.1) [^\circ K]$$

$$q_{conv} = 695.2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{rad} = E_i * \sigma * (T_{s,i}^4 - T_a^4) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{rad} = 0.95 * (5.67 * 10^{-8}) \left[\frac{W}{m^2 \circ K^4} \right] * (410^4 - 302.1^4) [^\circ K^4]$$

$$q_{rad} = 1085.78 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{total,sup} = q_{rad} + q_{conv}$$

$$q_{total,sup} = 1780.98 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$Q_{rad+conv} = q_{total,sup} * A_{total}$$

$$Q_{rad+conv} = 1780.98 \left[\frac{W}{m^2} \right] * 1.51 m^2 = 2.68 KWh$$

$$Q_{rad+conv} = 9681.4 \frac{KJ}{h}$$

$$\% \text{ Pérdida}_{rad+conv} = \frac{Q_{rad+conv}}{\dot{m}_{combustible} * PCI} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{rad+conv} = \frac{9681.4 \frac{KJ}{h}}{511739.24 \frac{KJ}{h}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{rad+conv} = 2 \%$$

Pérdida por solidos disueltos en el agua

$$C_f = 900 \text{ ppm}$$

$$C_b = 30000 \text{ ppm}$$

$$S = 145.33 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$P_{abs} = 4.513 \text{ bar}$$

$$h_b = 623.6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$T = 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_f = 4.186 * 27 = 113.02 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Tasa de purga

$$B = S * \frac{C_f}{C_b - C_f} = 145.33 * \frac{900}{30000 - 900} = 4.49 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Energía perdida

$$Q = B * \Delta h = 4.49 * (623.6 - 113.02) = 2294.92 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$\% \text{ Pérdida}_{\text{sólidos disueltos}} = \frac{Q_{\text{purga}}}{\dot{m}_{\text{combustible}} * PCI} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{\text{sólidos disueltos}} = \frac{2294.92 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}}{511739.24 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdida}_{\text{sólidos disueltos}} = 0.448 \%$$

ANEXO B

Evidencia de mantenimiento de caldera



Medidor de calidad de vapor



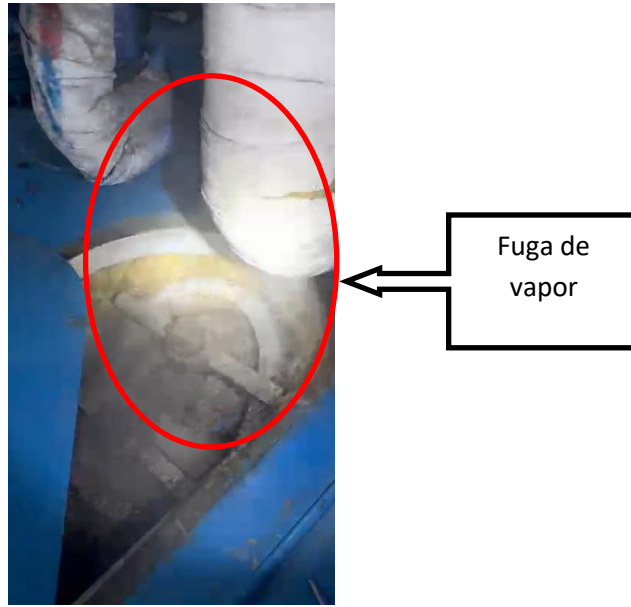
Válvula de purga



Maguera de transporte de combustible



Elaboración de tubos de vidrio para medidor de calidad de vapor



Cambio de empaque en caldera por fuga de vapor



Incrustaciones en tuberías de caldera.



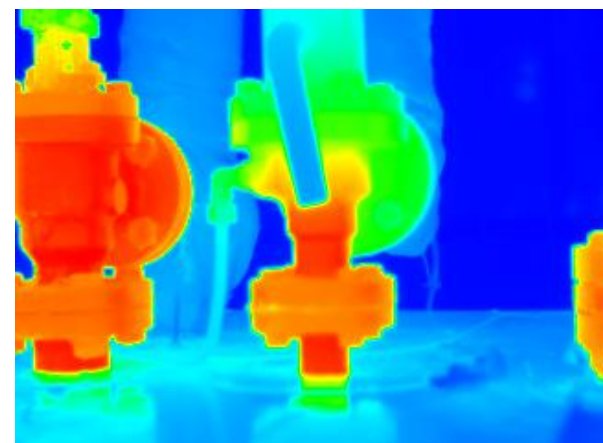
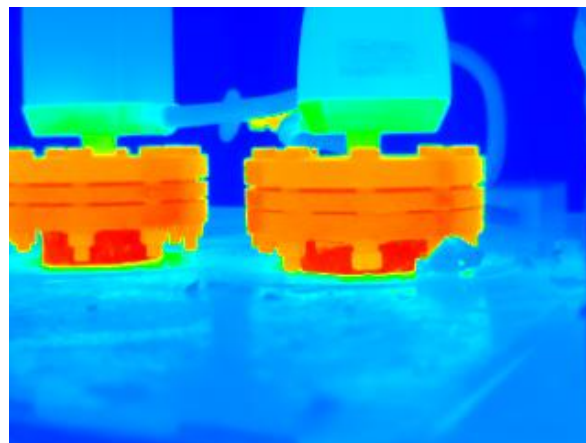
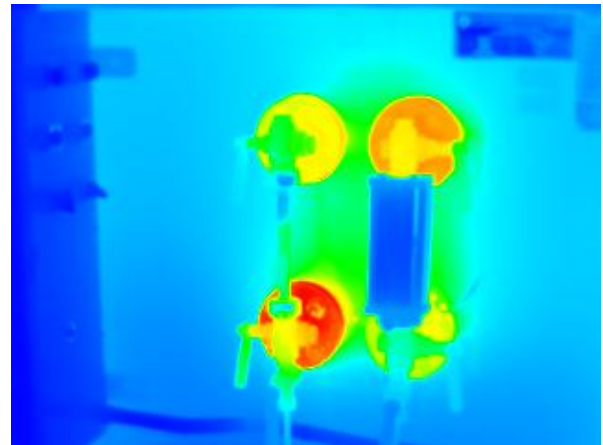
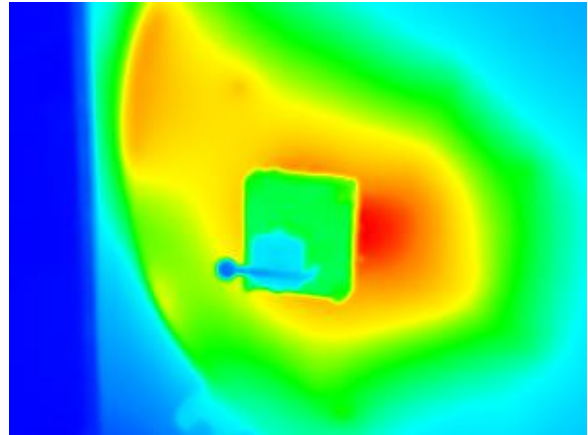
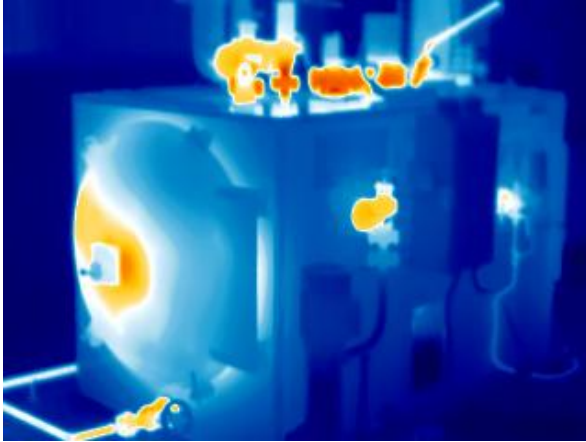
Estado actual de tubos de humo



Fuga de vapor en llave de caldera

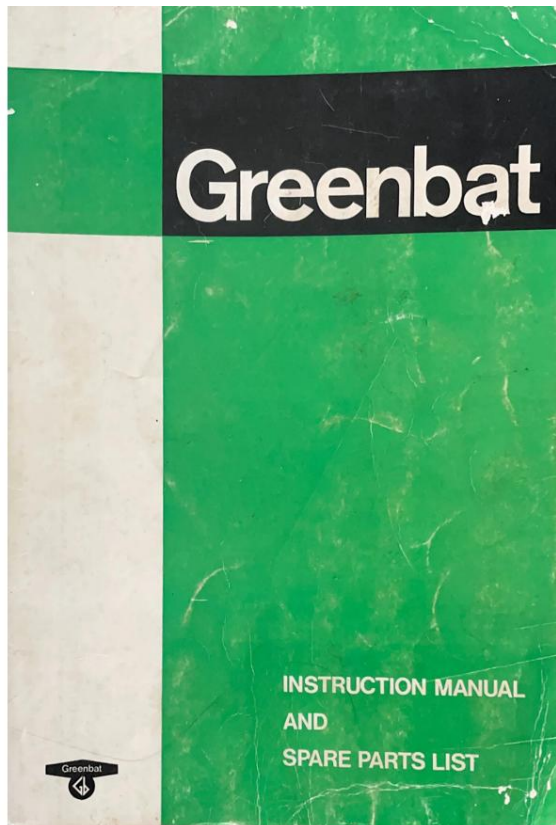
ANEXO C

Imágenes termográficas de caldera reacondicionada.



ANEXO D

Manual de turbina (Unidad dinamométrica C/D3000)



12

turbine speed and vice versa. In some low speed governors, the adjusting nut is locked in position by a grub screw.

The governor spindle ball is lubricated by drip feed through a sight feed regulator in some turbines and by pressure-feed in other types. flow should be set to 6 drops per minute on turbines with output speeds up 3000 RPM. The rate can be increased on higher speed final drive turbines.

Overspeed Trip Governor. - The emergency trip governor, fitted at the gearcase end of the constant speed governor body consists of a spring-loaded eccentric ring which is set to fly outwards at a pre-determined speed when the centrifugal force acting on it overcomes the spring pressure. The ring then strikes a lever or plunger which actuates the stop valve trip linkage, closes the valve and stops the turbine. The usual clearance setting between the ring and the plunger is 2 mm.

To adjust the tripping speed the governor housing must first be removed. Care should be taken to prevent the spindle ball from falling to the ground. Unscrew the governor body from the final drive shaft. The handing of the thread which varies according to the direction of rotation, is stamped on the outer circumference of the governor body. Place the governor assembly on a clean sheet of paper on the bench. Remove the locking pin - if fitted - before unscrewing the trip ring plunger. Add shims to the trip washer to increase the spring compression and so the speed at which the device operates. Alternatively, reduce the thickness of the washer to reduce the trip speed. The plunger must always be secured in position with a locking pin after an adjustment has been made although it may originally have been secured by deforming the end of the plunger thread.

Governor Valve And Linkage. The valve is a lever operated unit of conventional it is essential that the operation of the valve and actuating lever system is completely smooth and even. Any irregularity or stiffness must be rectified immediately.

The lever operated, steam-pressure-sealed rocking shaft in the valve body is mounted in phosphor bronze bushes. Excessive leakage of steam from the ends of the shaft indicates either the presence of dirt in the steam seal or excessive wear which necessitates replacement of the bushes. During removal of the rocking shaft, the governor valve actuating lever in the valve body must be supported to prevent damage to the valve.

Governor Stroke. - The stroke of the governor is the width of the gap between the end of the governor spindle ball cage and the face of the pivoted valve actuating lever when the valve is seated, i.e. closed. This measurement, which varies between 3 mm. and 6 mm., can only be checked with the turbine at rest and the pivoted

3

SPECIFICATION - EDUCATIONAL TURBINE UNIT

Turbine Type	- C/D 3000 Dynamometer Unit
Serial Number	- 520362

Design Operating Conditions

Steam Pressure	- 9.66 bar gauge
Temperature	- 38°C superheat = 225°C
Exhaust Pressure - condensing	- 0.85 - 0.88 bar vacuum
Exhaust Pressure - non condensing	- Atmosphere
Final Drive Speed	- 3000 rpm
Trip Speed, % above design speed	- +10%
Output Power @ Design Speed	- 10 Kw
Working Oil Pressure	- 0.35 - 0.7 bar gauge
Minimum Oil Pressure	- 0.21 bar gauge

Physical Constants

Torque Arm Radius	- 0.305 m.
Speed Reduction Ratio	- 8:1
Nozzle Throat Diameter, condensing.	- 4.6 mm - 3.5
Nozzle Throat Diameter, non-cond.	- 6.6mm - 5.5

Purchase Particulars

Client	- Ward's Patents
Site	-

13

actuating lever pulled back to the limit of its travel. The governor valve is closed when the lever is in this position. The adjustor on the actuating lever enables the stroke to be adjusted. Always tighten the locknut after making an adjustment.

The stroke is correctly set at the factory but may have to be altered to take up wear or because of altered steam conditions. **With low steam pressures - below 100 psig (6.9 bar) the governor valve may need to be opened wider to allow a greater volume of steam to pass into the steam chest.**

This adjustment is not a means of speed regulation, which is covered in the section under the heading 'Constant Speed Governor'.

Oil Cooler. - The flow of coolant should be initially set to provide the correct oil temperature by means of the outlet cock. The inlet cock should be fully open. The designed oil temperature differential across the cooler is approximately 20 - 30°F. (11.1 - 16.7°C). When the differential is reduced, the cooler should be cleaned. The frequency of the need for this operation cannot be accurately foretold as it will depend on the nature and quantity of salts dissolved in the coolant. To obviate the need for the remaking pressure-tight joints, cleaning of the oil passages with steam is recommended.

Carbon Glands. - The only adjustment that can be made is to reduce the internal diameter of the segments by gently rubbing down the butt surfaces with extra fine emery paper to counter the effect of wear caused by the rotation and thermal expansion of the shaft. The segments should then be laid in a circle on a clean flat surface to check that the radial butts fit together satisfactorily.

If there is any doubt about the condition of the glands or gland sleeves, new replacements should always be fitted.

Although the glands are interchangeable when new, they 'bed down' after a period of use. If it is decided to re-install the original carbons, care must be taken to ensure that they are replaced in the same sequence as originally fitted. Each set of segments comprising one carbon ring has been machined as an individual. Each segment carries a number which identifies the ring to which it belongs. On no account may segments from different rings be mixed up or assembled together.

If new or reconditioned rings have been fitted, they will require 'running in' and it is important that no overheating occurs during this period.

To dismantle a gland assembly, first remove the top half of the housing to expose the sleeves. Lift off the sleeve sections to expose the carbon rings. Mark each sleeve and carbon segment so that they can be reassembled in the original order. Release

ANEXO E

Cotizaciones caldera nueva



Nombre comercial: CALDEROS Y AFINES S.A.
CALDEFIN
Razón Social: CALDEROS Y AFINES S.A. CALDEFIN
RUC/CI: 0991384995001
Dirección: KM 11.5 VÍA A DAULE LOTIZACIÓN
INDUSTRIAL INMACONSA CALLE CEDROS MZ 30
SOLAR 3
Correo: ventas@equaboiler.com.ec
Teléfono: 0992773511

COTIZACION: No. 202509000862

Cliente: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ESPOL
CI/RUC: 0960002780001
Dirección: N/A
Teléfono: 0983589107
Fecha Emisión: 01/09/2025

#	Item	Cantidad	Precio	Subtotal
1	CALDERA DE VAPOR HORIZONTAL CAPACIDAD 15BHP DIESEL - CALD-ST-HORIZ-15BHP	1.00 Unid.	\$24360.0000 00	\$24,360.00

Información Adicional

Descripción: P.R/ CALDERO HORIZONTAL 15BHP - DIESEL
//FABRICACIÓN BAJO CÓDIGO INTERNACIONAL ASME
BOILER & PRESSURE VESSEL CODE (BPVC)//AMERICAN
SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. SECCIÓN I .
REGLAS PARA CONSTRUCCIÓN DE CALDEROS DE
PODER. // QUEMADOR UNA ETAPA EQUABOILER// PANEL
ELÉCTRICO// TANQUE REALIMENTACION //***INCLUYE:
Calibración, ajuste y pruebas de correcta operación en planta
cliente, dentro del país sin costo adicional. Arranque y puesta en
marcha //** NO INCLUYE: OBRA CIVIL PARA LAS BASES DEL
CALDERO NINGÚN TRABAJO O MATERIAL NO
ESPECIFICADO EN LA PRESENTE OFERTA MONTAJE
MECÁNICO DE TUBERÍAS NI ACOMETIDA ELÉCTRICA
MATERIALES PARA EL MONTAJE DE CALDERO

Garantía: *Calderos y Afines garantiza la calidad, resistencia y buen
funcionamiento por el período de un año

Forma de Pago: 70% ANTICIPO / 30% ANTES DE ENTREGA FÍSICA
:
FORMA DE PAGO: 70% ANTICIPO / 30% ANTES DE
ENTREGA FÍSICA // TIEMPO DE ENTREGA: 30 días
laborables, a partir del siguiente día hábil de recibir EL
ANTICIPO. // LUGAR DE ENTREGA: Planta Calderos y Afines
S.A.

:
*NO INCLUYE ENVÍO //**ESTA COTIZACIÓN SE EMITE BAJO
LAS ESPECIFICACIONES PROPORCIONADAS POR EL
CLIENTE. NO SE ACEPTAN DEVOLUCIONES NI SE OFRECE
REEMBOLSO UNA VEZ CONFIRMADO EL PEDIDO. NOS
DESILGAMOS DE CUALQUIER RESPONSABILIDAD
DERIVADA DEL USO, MANEJO O APLICACIÓN DE LOS
PRODUCTOS UNA VEZ ENTREGADOS

Usuario: Jessenia Lopez Zurita

Descuento:	\$0.00
Subtotal 15%:	\$24,360.00
Subtotal 5%:	\$0.00
Subtotal 0%:	\$0.00
IVA 15%:	\$3,654.00
IVA 5%:	\$0.00
Total:	\$28,014.00
Saldo:	\$28,014.00



300KG/H Diesel Steam Boiler

QUOTATION

Technical parameters of boiler

Project	Unit	Specification
Steam Capacity	Kg/hr	300
Rated working pressure	Mpa	0.7
Working pressure	Mpa	As required
Hydraulic testing pressure	Mpa	1.05
Light diesel oil	Kg/h	21
Thermal Efficiency	/	90%
Power Supply	/	440V/60HZ/3P
Saturated steam temperature	°C	170
Real steam temperature	°C	Depend on boiler pressure
Main steam valve diameter	DN	32
Safety valve diameter	DN	25
Water in diameter	DN	15
Sewage valve diameter	DN	25
Chimney diameter	DN	150
Overall dimension L*W*H)	mm	1100*1500*2200
Weight	kg	650
Wilford could provide customized products with specific power supply in the world .		

Boiler quotation sheet

No.	Description	Model	Qty.	Unit	Unit price	Total	Remark
1	Steam boiler	LSS0.3-0.7	1	Set			ZPET
2	Water treatment	RUNXIN-0.5 T	1	Set			RUNXIN Including resin, resin barrel. Salt box, adjuster etc.
3	Steam header	Φ159	1	Set			China national standard. Carbon steel material, one in three out. valve included
4	Soft water tank	50L	1	Set			赠送
5	Oil tank	50L	1	Set			赠送
6	Chimney	Φ250	6	M			ZPET
TOTAL ABOVE EXW IN USD 8000USD							

Cálculo de costos de importación

Descripción	Costo
Caldera (EXW)	\$8.000,00
Gastos locales	\$550,00
Flete marítimo (carga suelta)	\$1.400,00
Agente/tramitador Aduana	\$500,00
Camión (entrega Ecuador)	\$300,00
Seguro	\$150,00
Impuestos	\$1.800,00
TOTAL	\$12.700,00