

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Diagnóstico operativo de la caldera 2 de la empresa Palmeras de Puerto Wilches
S.A.

Juan Diego Ramírez Triana

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico

Directora Diana Paola Duarte Duarte

Ingeniera química, Ph. D

Codirectora Viviana Sánchez Torres

Ingeniera química, Ph. D

Tutor Óscar Mauricio Díaz Rodríguez

Ingeniero químico, M. Sc

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, para guiar cada paso de mi camino y permitirme llegar hasta este gran logro.

A mis padres, Nelly y Juan Carlos, por su amor incondicional, su ejemplo constante de esfuerzo y por enseñarme el valor de la perseverancia.

A mi melliza Maira, por su apoyo, alegría y por ser una inspiración diaria para seguir adelante.

A todos ellos, con profundo cariño y gratitud, les dedico este logro que también es suyo.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a todo el personal de Palmeras Puerto Wilches S.A. por su apoyo y disposición durante mi instancia aquí. En especial, al ingeniero Óscar y a la ingeniera Camila por brindarme su apoyo, conocimiento y acompañamiento en esta etapa de mi formación como ingeniero químico.

A las profesoras Viviana y Diana, por su constante disposición, guía académica y acompañamiento durante este proceso formativo, que han contribuido significativamente a mi crecimiento profesional y personal.

De igual manera, extendiendo mi gratitud a la señora Helena por su amabilidad y a la auxiliar Katherin por su constante colaboración en la empresa.

A mi mejor amigo, Ángel Ríos, por su apoyo constante y por acompañarme a lo largo de este proceso. Su respaldo fue importante en esta gran etapa.

De manera especial, también expreso mi agradecimiento a los compañeros como con quienes tuve la oportunidad de compartir a lo largo de diversas asignaturas. En particular, a mis amigos Andrés Rangel y César Caviedes, a quienes conocí desde el primer día de clases y quienes, con su apoyo constante, compañerismo y amistad, fueron fundamentales en mi proceso de formación académica y personal.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Marco conceptual	14
2.1 Combustible en calderas de biomasa.	14
2.2 Sistema de combustión y generación de vapor	15
2.3. Aprovechamiento térmico y cogeneración.....	17
2.4. Tratamiento del agua de alimentación.....	17
2.5. Control automático de la caldera.....	18
2.6 Control ambiental de gases de combustión	19
3. Metodología	19
3.1 Reconocimiento del sistema de calderas	20
3.2 Identificación de variables críticas con base en la literatura.....	21
3.2.1 Revisión y recopilación bibliográfica	21
3.2.2 Selección de variables críticas.....	21
3.3 Análisis de variables operativas	21
3.3.1 Inspección general.....	21
3.3.2 Registro de variables críticas de proceso	22
3.3.3 Depuración y análisis de datos	23
3.4 Estrategias de mejora para la caldera 2 basadas en el diagnóstico operativo	23
4. Resultados	24
4.1 Identificación de variables críticas	24
4.2 Diagnóstico operativo en planta.....	26
4.2.1 Condiciones generales del sistema de calderas	26
4.2.2 Diagnóstico caldera VR2.....	29
4.3 Estrategias de mejora para la caldera 2 basadas en el diagnóstico operativo	35
4.3.1 Estrategias implementadas	36
4.3.2 Estrategia propuesta (mediano y largo plazo)	42
5. Conclusiones	44
6. Recomendaciones.....	45
Referencias bibliográficas	46

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Apéndices49

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Variables críticas de proceso seleccionadas.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Datos de humedad obtenidos.....</i>	<i>27</i>

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Lista de figuras

Figura 1. Esquema representativo de caldera VR Ingeniería 12 ton.	12
Figura 2. Fruto de palma africana.	15
Figura 3. Plano lateral Caldera VR2 Palmeras de Puerto Wilches.	16
Figura 4. Diagrama de flujo de las etapas metodológicas.	19
Figura 5. Comportamiento temperatura salida de precalentadores.	30
Figura 6. Comportamiento temperatura de ingreso ventilador primario.	31
Figura 7. Comportamiento temperatura promedio del hogar caldera 1 y 2.	32
Figura 8. Ductos de alimentación calderas de PPW.	34
Figura 9. Flujo másico producido en promedio por las calderas.	35
Figura 10. Válvula tipo globo instalada.	37
Figura 11. Comportamiento temperatura salida de precalentadores después de la instalación de la válvula.	38
Figura 12. Comportamiento temperatura salida de precalentadores después del ajuste del controlador PID.	39
Figura 13. Comportamiento temperatura entrada aire ventilador primario después del ajuste del controlador PID.	40
Figura 14. Flujo másico producido en promedio por las calderas después de las estrategias de mejora implementadas.	41

Lista de apéndices

<i>Apéndice A. Diagrama de bloque del sistema de calderas de PPW.....</i>	<i>49</i>
<i>Apéndice B. Tablas seguimiento tratamiento agua para calderas.</i>	<i>50</i>
<i>Apéndice C. Diagrama de flujo sistema de calderas de la empresa.</i>	<i>51</i>
<i>Apéndice D. Especificaciones técnicas válvula instalada.</i>	<i>52</i>
<i>Apéndice E. Datos medición alimentación de combustible a calderas.</i>	<i>53</i>

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Resumen

Título: Diagnóstico operativo de la caldera 2 de la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.*

Autor: Juan Diego Ramírez Triana**

Palabras clave: Caldera de biomasa, diagnóstico operativo, generación de vapor, eficiencia térmica.

Descripción:

En la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A., el vapor generado en calderas de biomasa es fundamental para la extracción de aceite de palma. La empresa cuenta con dos calderas gemelas operativas destinadas a este proceso instaladas en el 2006. En este contexto, la Caldera 2 presenta una producción de vapor aproximadamente 18% inferior respecto a la Caldera 1, evidenciando oportunidades de mejora en su desempeño operativo. Por ello, en este trabajo de grado se realizó un diagnóstico operativo con el fin de identificar variables críticas y definir acciones de mejora.

A partir de una revisión bibliográfica, se seleccionaron y monitorearon variables como la temperatura en los precalentadores, la temperatura del aire de ventilación primaria y el flujo másico de combustible. Se evidenció que el precalentador 2 no alcanza el valor requerido por el fabricante (105 °C), registrando inicialmente 98.2 °C. Como acción correctiva, se instaló una válvula tipo globo para mejorar la distribución de vapor y se ajustó el lazo de control PID mediante autotuning con el PLC Siemens S7-1200, permitiendo una adecuada sintonización del sistema. Como resultado, la temperatura aumentó a 105.3 °C, cumpliendo el valor requerido.

El incremento del flujo de vapor hacia los radiadores permitió elevar a su vez la temperatura del aire de ventilación primaria de 63.7 °C a 67.9 °C, mejorando las condiciones de combustión. Esto se reflejó en un aumento de la producción de vapor de 8938 kg/h a 9905 kg/h y en una mayor estabilidad térmica, validada mediante diagramas de caja y bigotes.

Adicionalmente, se identificaron limitaciones en la alimentación de biomasa por la inclinación del ducto (45°). Como mejora, se propuso la instalación de vibradores neumáticos y la corrección geométrica del ducto. El estudio valida la efectividad de las acciones implementadas y establece bases para la mejora energética del sistema.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte
Doctora en Ingeniería Química. Codirectora: Viviana Sánchez Torres, Doctora en Ingeniería Química.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Abstract

Title: Operational diagnosis of boiler 2 at Palmeras de Puerto Wilches S.A. *

Author: Juan Diego Ramirez Triana**

Keywords: Biomass boiler, operational diagnosis, steam generation, thermal efficiency.

Description:

At Palmeras de Puerto Wilches S.A., the steam generated in biomass-fired boilers is essential for the palm oil extraction process. The company operates two parallel boilers dedicated to this process, which were installed in 2006. In this context, Boiler 2 exhibited steam production approximately 18% lower than Boiler 1, indicating opportunities for performance improvement. Therefore, this undergraduate thesis conducted an operational diagnosis to identify critical variables and define improvement actions.

Based on a literature review, key variables such as preheater temperature, primary air ventilation temperature, and fuel mass flow rate were selected and monitored. It was observed that Preheater 2 did not reach the manufacturer's required value (105 °C), initially recording 98.2 °C. As a corrective action, a globe valve was installed to improve steam distribution, and the PID control loop was adjusted through autotuning using a Siemens S7-1200 PLC, achieving proper controller tuning. As a result, the temperature increased to 105.3 °C, meeting the required value.

The increase in steam flow to the air heaters also raised the primary air temperature from 63.7 °C to 67.9 °C, improving combustion conditions. This led to an increase in steam production from 8938 kg/h to 9905 kg/h and enhanced thermal stability, validated through box-and-whisker plots.

Additionally, limitations in biomass feeding were identified due to a 45° inclination in the feeding duct. As improvement strategies, the installation of pneumatic vibrators and the geometric correction of the duct were proposed. The study validates the effectiveness of the implemented actions and establishes a technical basis for improving the system's energy performance.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Diana Paola Duarte Duarte, Doctor in Chemical Engineering. Co-director: Viviana Sanchez Torres, Doctor in Chemical Engineering.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Introducción

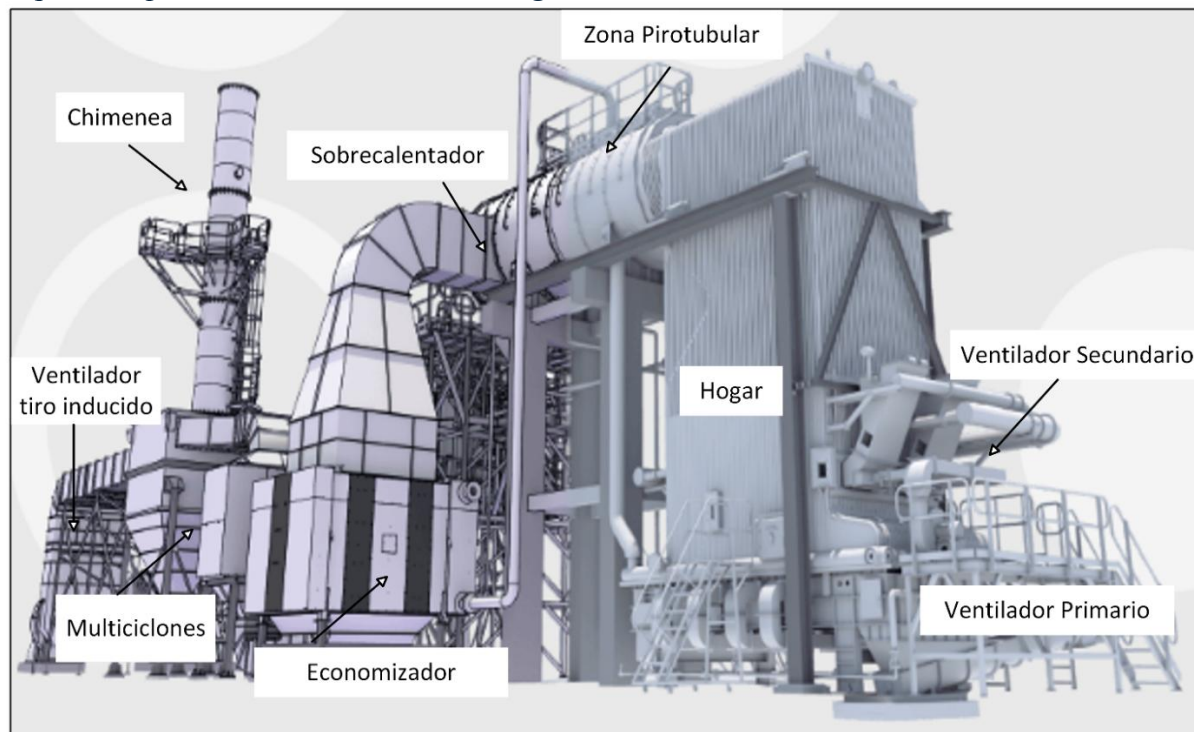
Palmeras de Puerto Wilches S.A. (PPW) es una empresa con más de 40 años de trayectoria, dedicada a la producción de aceite crudo de palma, aceite de palmiste, torta de palmiste y torta de tricanter. Dentro de su cadena de producción del aceite de palma, el vapor es empleado en diversas etapas clave del proceso de extracción. Una de las principales aplicaciones se presenta en la esterilización de los racimos de fruta fresca (RFF), donde permite el ablandamiento del fruto, facilita su desprendimiento del raquis y favorece la posterior liberación del aceite. Adicionalmente, el vapor es utilizado en las etapas de digestión y prensado, en las cuales es necesario mantener condiciones térmicas controladas para asegurar una adecuada eficiencia de extracción. A su vez en la etapa de clarificación, el aporte de vapor evita la solidificación del aceite y posibilita una separación eficiente de las fases (Wambeck, 2005).

En la planta, el vapor se genera mediante dos calderas de biomasa tipo combinada de la marca *VR Ingeniería*, con una capacidad nominal de 12 ton de vapor/h cada una. El combustible de estas calderas es cascarilla y fibra de palma, subproductos del propio proceso industrial. Cada caldera está conformada por un conjunto de equipos y sistemas auxiliares diseñados para garantizar una combustión eficiente y una adecuada transferencia de calor. Entre éstos se incluyen ventiladores destinados a la inyección de combustible y al suministro de aire, así como intercambiadores de calor que permiten el aprovechamiento energético de los gases calientes y del mismo vapor producido en la caldera como fluido de calentamiento, contribuyendo al aumento de la eficiencia térmica del sistema. En la **Figura 1** se presenta un esquema representativo de las calderas tipo combinada de la marca VR Ingeniería, donde se pueden identificar los principales componentes de este equipo.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Figura 1.

Esquema representativo de caldera VR Ingeniería 12 ton.



Nota; Tomado del catálogo calderas de biomasa VR ingeniería (VR Ingeniería, 2026).

En PPW se ha evidenciado que la caldera 2 presenta una producción de vapor inferior del 18% respecto a la caldera 1, lo que genera un desbalance operativo y limita el aprovechamiento de la capacidad instalada. Esta situación afecta directamente la eficiencia global de la planta, por lo que resulta esencial evaluar su operación bajo criterios técnicos y operativos. En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo efectuar un diagnóstico integral de la caldera 2 de la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A., con el fin de identificar las variables críticas que limitan su capacidad de generación de vapor y establecer indicadores técnicos que permitan evaluar su desempeño.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Efectuar un diagnóstico de las variables operativas que afectan la generación de vapor en la Caldera 2 instalada en la empresa Palmeras de Puertos Wilches S.A.

1.2 Objetivos específicos

1.2.1. Identificar con base en información técnica y científica, las variables críticas más relevantes que afectan el rendimiento de una caldera de biomasa.

1.2.2. Analizar el comportamiento de las variables operativas seleccionadas en la Caldera 2 y su influencia en la generación de vapor.

1.2.3. Proponer estrategias de mejora para el desempeño de la caldera 2, fundamentadas en el diagnóstico operativo realizado.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

2. Marco conceptual

El vapor constituye uno de los recursos más importantes en el funcionamiento de las plantas extractoras de aceite de palma, ya que actúa como la principal fuente de energía térmica. Su aprovechamiento eficiente permite realizar operaciones esenciales como el acondicionamiento del fruto, la digestión, el prensado y la clarificación del aceite crudo. Además, el vapor sobrecalentado puede ser utilizado en sistemas de cogeneración, impulsando una turbina para la producción de energía eléctrica y optimizando así el uso de energía dentro de la planta (Smith & Van Ness, 2018). En este sentido, la generación, distribución y aprovechamiento del vapor representan un componente fundamental para garantizar la continuidad operativa, la eficiencia térmica y la sostenibilidad del proceso industrial de extracción de aceite de palma (Wambeck, 2005)

2.1 Combustible en calderas de biomasa.

La biomasa utilizada como combustible en las calderas proviene de los subproductos del proceso de beneficio del fruto de palma de aceite, principalmente la fibra del mesocarpio y el cuesco (Figura 2). Estos residuos lignocelulósicos poseen un poder calorífico superior (PCS) de alrededor de $17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para la fibra y $19 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para la cascarilla, lo cual los convierte en combustibles eficientes para la generación de vapor (Pérez Rodríguez et al., 2023).

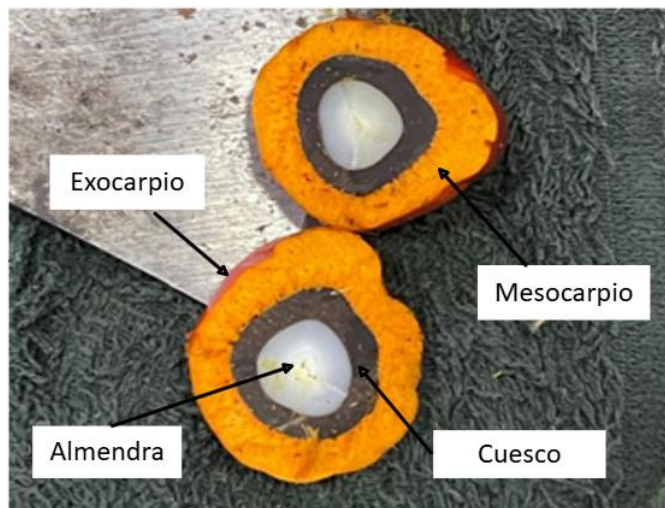
En el contexto de la agroindustria de la palma en Colombia, por cada tonelada de racimo de fruta fresca (RFF) procesada se generan aproximadamente entre 0.13 y 0.15 toneladas de fibra y entre 0.05 y 0.07 toneladas de cuesco, lo que representa una fracción significativa de residuos con potencial energético aprovechable. En plantas extractoras como Palmeras de Puerto Wilches S.A., este volumen de subproductos permite cubrir una parte importante de la demanda térmica del proceso.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Su aprovechamiento energético contribuye significativamente a la autosuficiencia térmica del sistema industrial, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y el impacto ambiental asociado a la disposición inadecuada de estos residuos (Pérez Rodríguez et al., 2023).

Figura 2.

Fruto de palma africana.



2.2 Sistema de combustión y generación de vapor

El combustible es alimentado al hogar de la caldera sobre una parrilla fija, siendo impulsado por un ventilador de inyección que asegura una distribución homogénea sobre la superficie de combustión. El suministro de aire necesario para el proceso se realiza mediante ventiladores primario y secundario, encargados de aportar el oxígeno requerido para una combustión controlada y eficiente que favorece la oxidación completa de los gases. El aire primario es previamente precalentado a su ingreso al hogar mediante radiadores alimentados con vapor proveniente del sistema de calderas, los cuales permiten elevar su temperatura y mejorar las condiciones de ignición y estabilidad de la combustión; en contraste, el aire secundario es suministrado directamente al proceso sin pasar por intercambiadores de calor, por lo que su temperatura depende principalmente

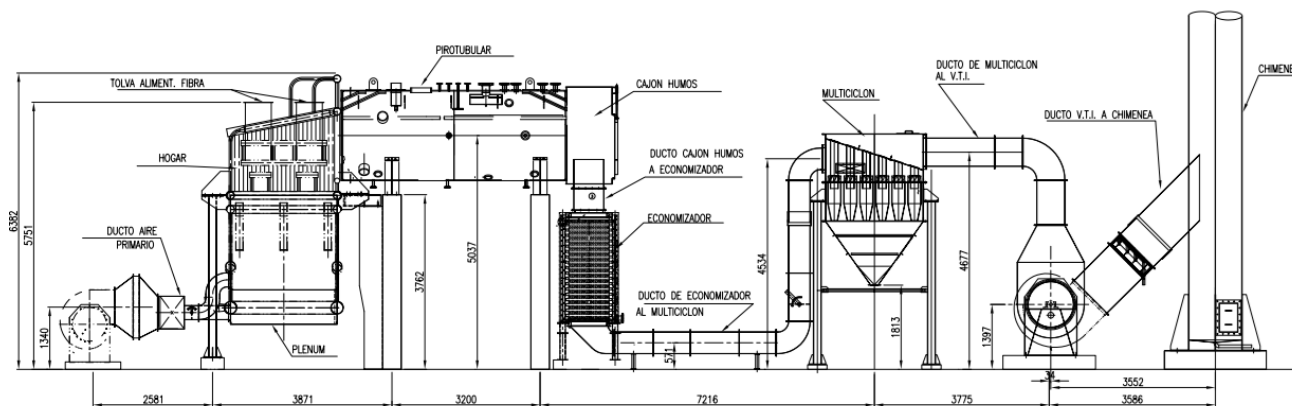
DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

de las condiciones ambientales y del funcionamiento del ventilador. Estos ventiladores centrífugos operan bajo un lazo de control de presión, con una presión de operación de 305 psi. Las cenizas generadas durante la combustión son evacuadas hacia la parte inferior de la parrilla mediante chorros de vapor, garantizando una limpieza continua del sistema y evitando obstrucciones que puedan afectar el adecuado flujo de aire (VR Ingeniería, 2006).

En la **Figura 3** se presenta el plano lateral de la caldera, donde se aprecia la disposición de los componentes internos y los sistemas auxiliares descritos.

Figura 3.

Plano lateral de la Caldera VR2 Palmeras de Puerto Wilches.



Nota: Plano lateral proporcionado por fabricante VR ingeniería (2006).

En la cámara de combustión, la biomasa alcanza temperaturas entre 750 °C y 900 °C, dependiendo de su humedad y composición (Gómez, Rojas & Martínez, 2020). El diseño del hogar favorece una mezcla homogénea entre aire y combustible, asegurando una combustión completa y estable. El aire secundario, inyectado por ventiladores adicionales, mejora la oxidación de los gases combustibles y eleva la eficiencia térmica del sistema (Hidayat, 2024).

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Los gases calientes generados en la combustión ascienden hacia la zona pirotubular, donde transfieren su energía al agua contenida en el cuerpo de la caldera. En esta etapa, el agua se transforma en vapor saturado a temperaturas entre 215°C y 225°C, bajo una presión de 305 psia (Smith & Van Ness, 2018).

2.3. Aprovechamiento térmico y cogeneración

El vapor generado se destina a dos usos principales. Una parte se distribuye hacia los procesos industriales de esterilización, digestión, prensado y clarificación, donde cumple funciones de transferencia de calor esenciales para la extracción del aceite crudo y de palmiste. La otra fracción se dirige hacia el sobrecalentador, donde el vapor aumenta su temperatura hasta 320 °C. Este vapor sobrecalentado se utiliza posteriormente en una turbina de cogeneración eléctrica, que transforma la energía térmica en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica para consumo interno tal como se muestra en el diagrama de bloques del sistema (Apéndice A). (Ramos, 2021).

El aprovechamiento del vapor sobrecalentado mejora la eficiencia global del sistema, permitiendo la recuperación de energía y reduciendo la demanda externa de electricidad. De esta manera, el proceso logra integrar un ciclo térmico cerrado, donde la biomasa se convierte en la principal fuente de energía renovable para la planta extractora.

2.4. Tratamiento del agua de alimentación

En la planta de tratamiento de agua para calderas, se lleva a cabo un acondicionamiento fisicoquímico del agua alimentada orientado a la remoción de impurezas y al ajuste de parámetros como dureza, alcalinidad y conductividad, garantizando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas por la normativa de la Asociación Norteamericana de Ingenieros Mecánicos (ASME), Los valores internos usados por la empresa de estos parámetros y sus rangos de operación

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

se presentan en el **Apéndice B**. Posteriormente, el agua tratada es impulsada mediante un arreglo de bombas con presión de trabajo a 25 bar hacia un tanque de almacenamiento intermedio (tanque pulmón) con una capacidad de 24 m³, el cual cuenta con un serpentín interno calentado mediante el mismo vapor producido en las calderas.

Posteriormente, el agua pasa por los intercambiadores de calor, donde alcanza la temperatura de 105 °C (requerida por el fabricante) antes de ingresar al economizador. Cada intercambiador tiene una capacidad de paso de 12 m³/h de agua, con una transferencia térmica de 1.9130 MMBTU/h, optimizando así la eficiencia global del sistema.

2.5. Control automático de la caldera

El control automático de presión de vapor modula la velocidad de los ventiladores primario, secundario y de tiro inducido manteniendo la presión de operación (305 psia). Sin embargo, no existe control modulante sobre la apertura de las compuertas de biomasa, que operan únicamente en modo ON/OFF durante eventos de shutdown. Asimismo, se cuenta con un lazo automático de control de nivel de agua en la sección pirotubular, con una referencia del nivel de agua de 0.0 in de H₂O, garantizando la protección de los tubos contra el sobrecalentamiento (VR ingeniería, 2006).

Los diversos procesos de la empresa son monitoreados desde el cuarto de control y supervisión (control room) donde mediante el sistema software SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) diseñado por SPI (Servicios y proyectos industriales S.A.S), se registran las variables medidas por sensores en la planta tales como temperatura del hogar, presión de vapor, temperatura de gases en pirotubos, posición de dámper, flujo de vapor y temperatura de agua al economizador.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

2.6 Control ambiental de gases de combustión

Antes de su liberación a la atmósfera, los gases de combustión atraviesan un economizador, que recupera el calor residual de los gases, incrementando la eficiencia térmica. Luego estos pasan por un multiclones, encargado de retener partículas sólidas y cenizas volantes. Finalmente, un ventilador de tiro inducido mantiene la presión negativa en el sistema, asegurando el flujo adecuado de los gases hacia la chimenea (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018; Lachman, Pospíšil & Holub, 2021).

Este conjunto de dispositivos no sólo optimiza la eficiencia energética, sino que también contribuye al cumplimiento de la normativa ambiental vigente en Colombia, particularmente la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en concordancia con el Decreto 1076 de 2015, los cuales establecen los límites máximos permisibles de emisión para fuentes fijas, minimizando las emisiones atmosféricas y los impactos negativos sobre el entorno.

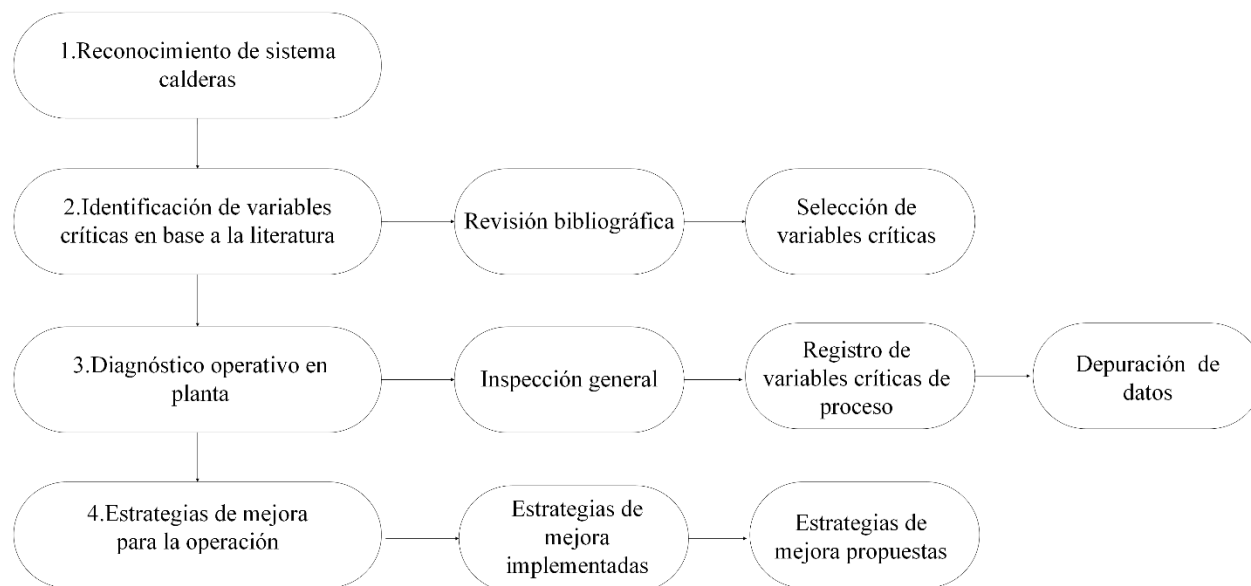
3. Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, se desarrolló una metodología estructurada en cuatro fases principales, las cuales se ilustran de manera esquemática en la **Figura 4**.

Figura 4.

Diagrama de flujo de las etapas metodológicas.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA



Nota: Metodología para alcanzar los objetivos planteados.

3.1 Reconocimiento del sistema de calderas

Durante el reconocimiento inicial se identificaron y ubicaron las principales partes del sistema de calderas, incluyendo el hogar, la parrilla fija, los ventiladores de aire, los ductos de alimentación de biomasa, el sistema de inyección de aire (primario y secundario) y el economizador. Posteriormente, se realizó también la inspección general de los sistemas auxiliares que intervienen en la generación de vapor, tales como la planta de agua de alimentación, el tanque pulmón y el sistema de precalentadores de agua. Adicionalmente, se llevó a cabo el reconocimiento del área del turbo generador, con el fin de comprender la interacción entre la producción de vapor y el aprovechamiento energético dentro de la planta, tal como se describe en el diagrama de flujo de proceso presentado en el **Apéndice C**.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

3.2 Identificación de variables críticas con base en la literatura

3.2.1 Revisión y recopilación bibliográfica

Se realizó una revisión documental en bases de datos especializadas como ScienceDirect, Scopus y repositorio de Fedepalma, así como en el libro "Sinopsis del proceso de aceite de palma" (Wambeck et al., 2005), a su vez en manuales técnicos de fabricantes de equipos del sistema de calderas. El objetivo de esta etapa fue la recopilación de información sobre las variables que influyen en el rendimiento térmico y operativo de calderas de biomasa.

3.2.2 Selección de variables críticas

Posteriormente, se seleccionaron los parámetros operativos más relevantes y aplicables a la Caldera 2, considerando su diseño, capacidad de generación de vapor, tipo de biomasa utilizada y las condiciones reales de operación del sistema.

La selección de estas variables se realizó con base en la revisión de literatura técnica sobre calderas de biomasa y en criterios de relevancia operativa, tales como su influencia en el desempeño térmico del sistema, su impacto en la eficiencia de combustión y la disponibilidad de medición o registro en planta. De esta manera, se priorizaron aquellas variables que presentan mayor incidencia en el proceso de generación de vapor y a las que se le pueden hacer un seguimiento a través de la instrumentación instalada en planta, para luego ser evaluadas mediante los datos operativos disponibles.

3.3 Análisis de variables operativas

3.3.1 Inspección general

En esta fase se realizó una inspección técnica del estado operativo de la caldera y sus sistemas auxiliares, con el fin de reconocer las condiciones reales de funcionamiento del sistema y

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

verificar en campo las variables previamente identificadas como críticas en la etapa de revisión técnica.

3.3.2 Registro de variables críticas de proceso

El diagnóstico se llevó a cabo durante el periodo comprendido entre el 15 y el 19 de septiembre de 2025, exceptuando el 17 de septiembre, fecha en la cual la planta se encontraba en actividades de mantenimiento semanal programado. Se realizó el seguimiento de las variables operativas críticas previamente definidas para el análisis del desempeño de la caldera.

Las variables fueron monitoreadas utilizando los instrumentos de medición instalados en planta, entre los cuales se encuentran termopares tipo K para la medición de temperatura de gases y vapor, manómetros tipo Bourdon para la medición de presión de vapor, flujómetros diferenciales para el seguimiento del flujo de vapor, y medidores de nivel tipo electrodo para el control del nivel de agua en la caldera.

Toda esta información fue almacenada en el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), y se completó con mediciones adicionales realizadas con equipos de laboratorio, incluyendo un secador de laboratorio convencional (modelo UN55, Memmert GmbH + Co. KG) y una balanza analítica (modelo GF-324A, A&D Company, Limited) empleados para la determinación del contenido de humedad del combustible mediante el método gravimétrico por pérdida de masa conforme a la norma ASTM E871 para biomasa. Además, se dispuso de una cámara termográfica (FLIR E6, FLIR Systems, Inc.) para medir la temperaturas en los sistemas de precalentamiento de aire y agua del sistema.

Durante el período de diagnóstico, las calderas operaron con combustible proveniente del proceso de extracción de aceite, operando cuatro prensas de 15 toneladas (P15Ton), que

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

corresponden a la configuración operativa habitual. Al combustible generado en el proceso, compuesto por fibra y cascarilla, se le realizaron cuatro mediciones de contenido de humedad en laboratorio.

3.3.3 Depuración y análisis de datos

Los datos obtenidos fueron organizados y depurados en hojas de cálculo, permitiendo su estructuración para el análisis comparativo frente a los valores nominales suministrados por el fabricante y los parámetros técnicos establecidos en la revisión bibliográfica.

El análisis estadístico se realizó mediante la construcción de diagramas de caja y bigotes (boxplot), con el fin de evaluar el comportamiento de las variables monitoreadas en términos de tendencia central y dispersión. A partir de estos diagramas, se analizaron métricas como la mediana, los cuartiles y la variabilidad de los datos, lo que permitió identificar desviaciones respecto a los valores esperados, así como posibles anomalías operativas que afectan el desempeño y la eficiencia en la generación de vapor.

3.4 Estrategias de mejora para la caldera 2 basadas en el diagnóstico operativo

A partir del diagnóstico operativo realizado y del análisis de las variables críticas que inciden en el desempeño de la Caldera 2, se formularon estrategias de mejora orientadas a mejorar su rendimiento térmico, estabilidad de combustión y confiabilidad operativa. Estas estrategias se clasificaron en dos categorías, en acciones implementadas durante el desarrollo del trabajo de grado y propuestas de mejora para su aplicación en el mediano y largo plazo. Esta distinción permite delimitar claramente el alcance de la intervención realizada y las oportunidades de mejora futuras.

4. Resultados

4.1 Identificación de variables críticas

A partir de la revisión bibliográfica y los manuales técnicos consultados, se identificaron las variables que presentan mayor influencia sobre el rendimiento operativo de calderas de biomasa. Estas variables fueron seleccionadas considerando la literatura especializada, el diseño de la caldera VR de 12 ton/h y las condiciones reales de operación observadas en planta. A continuación, en la **Tabla 1** se resumen las variables críticas seleccionadas.

Tabla 1.

Variables críticas de proceso seleccionadas.

Variable	Unidad	Valor deseado
Humedad del combustible	% b.s	% 12-37 b.s
Temperatura del hogar	°C	800-900°C
Temperatura agua de alimentación	°C	105°C
Temperatura de aire en ventilación primaria	°C	70°C

Nota: Estas variables sirvieron como base para orientar la toma de datos en campo y realizar los cálculos de desempeño térmico en las calderas.

En la literatura se han identificado múltiples variables críticas que condicionan la eficiencia de calderas de biomasa o combinadas. Una de las más relevantes es la humedad del combustible, que incide directamente sobre el poder calorífico útil. Cuanto mayor es el contenido de agua, mayor es la energía requerida para su evaporación, lo cual reduce la temperatura de la llama y la cantidad de vapor generado por unidad de combustible (Pérez Rodríguez et al., 2023).

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

De igual manera, el contenido de cenizas y su punto de fusión son factores determinantes en la aparición de problemas de incrustaciones y taponamiento, que disminuyen la transferencia de calor en los tubos y aumentan la temperatura del hogar, obligando a frecuentes limpiezas o paradas (Romeo, 2009; Hidayat, 2024).

A su vez, la temperatura del agua de alimentación se considera una variable crítica debido a que valores por debajo de la temperatura mínima recomendada (105 °C) pueden generar choques térmicos dentro de la caldera, provocando fatiga del material, microfisuras y un deterioro acelerado de los tubos y del economizador. Estos gradientes bruscos de temperatura no sólo reducen la vida útil de los componentes internos, sino que también incrementan los riesgos de fallas operativas y costos de mantenimiento (VR Ingeniería, 2006).

Otra variable crítica es la relación aire-combustible, cuya regulación inadecuada puede generar pérdidas energéticas. En sistemas de biomasa, se recomienda operar con un exceso de aire entre 20% y 40% (García-Sánchez et al., 2020). Valores superiores incrementan las pérdidas por gases calientes, mientras que valores inferiores favorecen la combustión incompleta y la formación de monóxido de carbono. Por ello, un control adecuado del suministro de aire y combustible es fundamental para garantizar la eficiencia y estabilidad del proceso.

Villegas (2023) reportó que la temperatura del aire de suministro del ventilador primario constituye una variable crítica en la operación de calderas. Al incrementarla de 20 °C a 93,7 °C mediante recuperación de calor residual, la eficiencia de una caldera pirotubular aumentó un 3,4 %, lo que equivalen a una ganancia de 0,34 t/h de vapor en una caldera de 10 t/h. Este resultado resalta la importancia que tiene el control de esta variable sobre el desempeño global del proceso.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

4.2 Diagnóstico operativo en planta

A partir del análisis de campo, la revisión de los registros operativos y las observaciones directas realizadas durante las jornadas de operación, se identificaron las principales condiciones que inciden en el desempeño térmico y la estabilidad operativa del sistema de calderas de la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A. Se evidenciaron variaciones significativas en variables críticas de operación, las cuales fueron analizadas y contrastadas con los lineamientos establecidos en la literatura técnica especializada y con los criterios de diseño de la *caldera VR* con capacidad nominal de 12 ton/h.

4.2.1 Condiciones generales del sistema de calderas

El agua de alimentación de calderas es captada de la quebrada del km 8 y es impulsada por un arreglo de bombas que operan a 25 bar, enviándola hacia un tanque pulmón con un set point de 85 °C, desde donde posteriormente ingresa a los intercambiadores de carcasa y tubos de cada caldera. La temperatura de operación a la salida de estos equipos debe ser de 105 °C según el fabricante, con el fin de garantizar condiciones adecuadas de entrada al economizador (VR Ingeniería, 2006).

El agua de alimentación para calderas es tratada en planta de agua donde se realiza un tratamiento químico y un seguimiento diario a los parámetros de pH, dureza, fosfato, alcalinidad, hierro, sílice y oxígeno disuelto por parte del equipo de laboratorio de la empresa. Todos estos parámetros se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por los criterios internos y de fabricación de las calderas, garantizando una operación estable y reduciendo el riesgo de corrosión en los tubos pirotubulares.

En la **Tabla 2** se muestran los resultados obtenidos por el equipo de laboratorio de la empresa donde se observa un contenido de humedad de 16,05 % en base seca para la cascarilla y

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

de 35,01 % en base seca para la fibra. Al comparar estos valores con los reportados por Cenipalma, se observa que la cascarilla presenta una humedad superior al valor de referencia (12 ± 1.08 % en base seca), mientras que la fibra se encuentra ligeramente por debajo del valor reportado (37.09 ± 2.06 % en base seca).

Tabla 2.

Datos de humedad obtenidos.

Fecha	Cascarilla	Fibra
	Humedad [% b,s]	Humedad [% b,s]
15/09/2025	15.96	35.51
16/09/2025	15.82	35.25
18/09/2025	15.92	34.11
19/09/2025	16.54	35.18
Promedio	16.05	35.01
Desviación estándar	0.3253	0.6181

Nota: [%b,s] Porcentaje de humedad en base seca.

La mayor humedad observada en la cascarilla, respecto a los valores de referencia reportados por Cenipalma, reduce el poder calorífico efectivo del combustible y afecta la estabilidad del proceso de combustión, constituyéndose en un factor crítico para el desempeño térmico de ambas calderas. En contraste, la fibra presenta un contenido de humedad cercano al valor de referencia, por lo que su impacto negativo sobre la combustión resulta menos significativo.

El contenido de humedad influye directamente en la eficiencia de combustión, ya que una fracción importante de la energía liberada se destina a la evaporación del agua contenida en la biomasa, lo cual disminuye la temperatura del hogar y el rendimiento global del sistema (Gómez, Rojas & Martínez, 2020). Adicionalmente, una mayor participación de cascarilla con humedad elevada puede generar combustión irregular y un aumento de gases no quemados, incrementando

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

las pérdidas energéticas asociadas a los gases de escape y reduciendo la eficiencia térmica de la caldera (Ramos, 2021; Barrera et al., 2018).

En cuanto a la gestión de la ceniza generada durante la combustión, el proceso de limpieza del hogar fue inicialmente diseñado como un sistema semiautomático mediante inyección de vapor a cinco parrillas inmóviles, la cual actuaba en ciclos de barrido para despejar las parrillas (VR Ingeniería, 2006). Sin embargo, en la actualidad esta operación se realiza de forma manual, requiriendo que el operario introduzca un rastillo de hierro para remover la acumulación de ceniza. Esta actividad toma aproximadamente 10 minutos por caldera y debe ejecutarse entre dos y tres veces por turno de ocho horas. Durante cada ciclo de limpieza se observa una reducción considerable en la presión de vapor, consecuencia de la descompensación generada al cerrar la compuerta de alimentación de biomasa y abrir la compuerta del hogar, condiciones necesarias para efectuar el barrido de las parrillas de manera manual. Por otro lado, esta práctica representa un riesgo significativo para los trabajadores, al exponerlos directamente a cenizas calientes y partículas finas, lo que puede generar quemaduras, irritación respiratoria y una mayor probabilidad de accidentes operativos, además de implicar esfuerzos físicos repetitivos que afectan la seguridad del proceso.

Adicionalmente, durante la operación normal de las calderas se realizan purgas de fondo rutinarias cada 30 minutos de manera manual por el operario de turno, mediante el accionamiento de las válvulas de purga inferiores de cada unidad, con el fin de controlar la concentración de sólidos disueltos y evitar la acumulación de sedimentos en el fondo del domo. Si bien esta práctica es necesaria para mantener la calidad del agua y proteger la integridad del equipo, también genera variaciones transitorias en la presión y en el balance térmico del sistema, que deben ser consideradas dentro del análisis del desempeño operativo.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

4.2.2 Diagnóstico caldera VR2

Durante la fase de diagnóstico se realizó el seguimiento de la temperatura de salida de los precalentadores, con el fin de evaluar su comportamiento operativo frente a los valores establecidos por el fabricante.

Como resultado, se evidenció que el precalentador 2 no alcanzaba la temperatura requerida de operación, registrando un valor promedio de salida de 98.2 °C frente a los 105 °C establecidos.

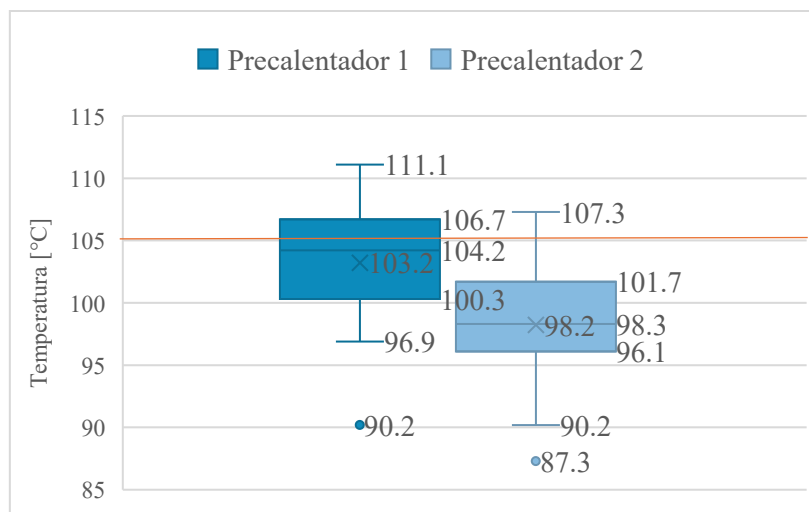
En la **Figura 5** se presenta el comportamiento de la temperatura de salida de los precalentadores durante el período de análisis. El precalentador 1 muestra una mediana cercana a 103.2 °C, con valores que oscilan aproximadamente entre 96.9 °C y 111.1 °C. Por su parte, el precalentador 2 presenta una mediana de 98.2 °C, con un rango aproximado entre 90.2 °C y 107.3 °C.

Adicionalmente, se observan valores atípicos en ambos equipos, destacándose un valor cercano a 90.2 °C en el precalentador 1 y valores de hasta 87.3 °C en el precalentador 2. En general, el precalentador 2 mantiene valores inferiores en comparación con el precalentador 1 durante el periodo analizado.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Figura 5.

Comportamiento temperatura salida de precalentadores.

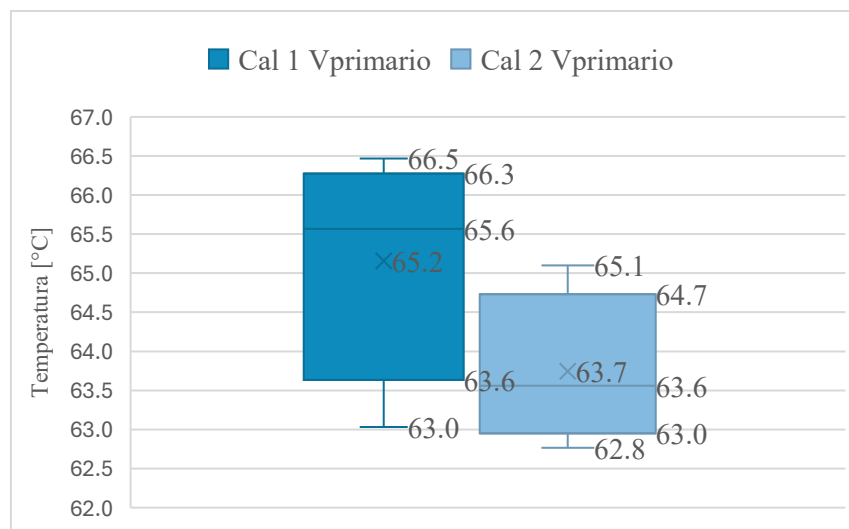


Nota: Datos tomados en planta del 15 al 19 de septiembre de 2025.

Estos resultados podrían explicar la afectación de la eficiencia global de la caldera, debido a la disminución de la temperatura del agua a la entrada del economizador, lo que reduce el aprovechamiento térmico y puede incrementar el riesgo de formación de incrustaciones, especialmente si la calidad del agua no es adecuada (Romeo, 2009; Hidayat, 2024).

Además, se evidenció que el comportamiento del aire de suministro del ventilador primario para ambas calderas presenta diferencias claras en sus temperaturas promedio de operación (**Figura 6**). En el caso de la caldera VR 1, el ventilador primario opera en un rango de temperaturas más elevado, mientras que en la caldera VR 2 se observan valores ligeramente inferiores. Cabe resaltar que ambos ventiladores primarios disponen de dos radiadores que operan con el mismo vapor de suministro proveniente de las calderas, los cuales tienen como función incrementar la temperatura del aire antes de su ingreso al hogar. No obstante, las diferencias observadas sugieren variaciones en la efectividad del intercambio térmico o en las condiciones operativas de estos radiadores.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Figura 6.*Comportamiento temperatura de ingreso ventilador primario.*

Nota: Datos tomados en planta durante fase diagnóstica.

Esta comparación permite identificar variaciones en las condiciones de suministro de aire primario, las cuales pueden influir directamente en la estabilidad del proceso de combustión y en el rendimiento térmico global de cada unidad, dado que la temperatura del aire primario incide en la eficiencia de la mezcla aire-combustible, en la velocidad de ignición y en la transferencia de calor dentro del hogar de la caldera. Las diferencias en estas condiciones pueden generar combustiones menos estables y variaciones en la eficiencia térmica, tal como se reporta en estudios de evaluación de desempeño térmico y control de combustión en calderas de biomasa (Gómez et al., 2020; Ramos, 2021; Villegas, 2023).

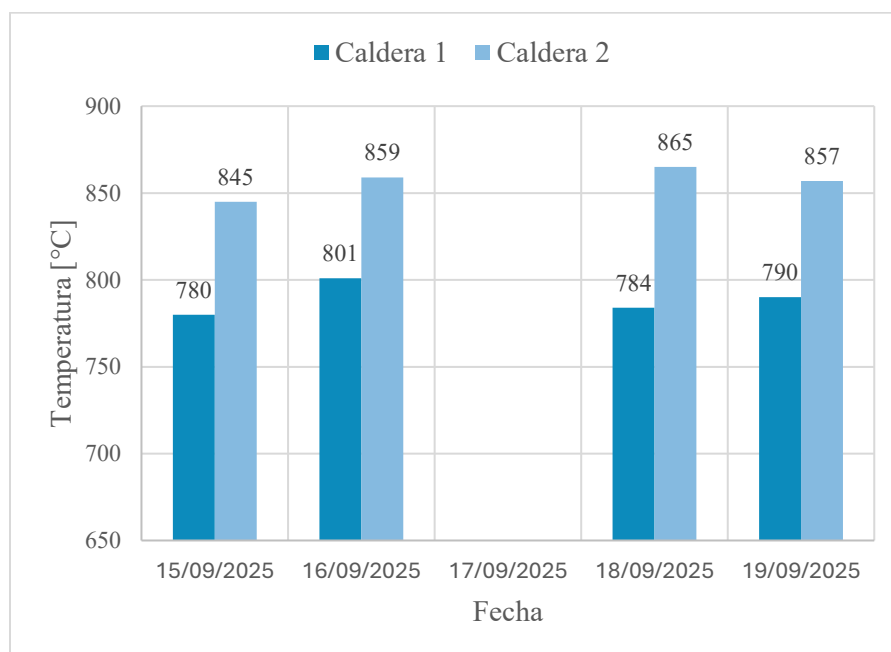
En cuanto a la zona de combustión, en la **Figura 7** se puede observar cómo la caldera 2 opera con una temperatura promedio del hogar de 857 °C, valor que se encuentra dentro de rangos aceptables para una combustión estable en este tipo de calderas según el fabricante. No obstante, la caldera 1 presenta una condición operativa menos favorable, reflejada en una menor temperatura

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

promedio de 791°C, lo cual puede incidir negativamente en la eficiencia del proceso y en la estabilidad de la combustión. Esta condición podría estar asociada a factores como la presencia de incrustaciones, desbalances en la distribución del aire de combustión o al desgaste progresivo del material refractario (Romeo, 2009). La degradación del material refractario, producto de la exposición continua a condiciones severas de operación, reduce su capacidad de aislamiento térmico y aumenta las pérdidas de calor hacia el exterior, afectando la temperatura media efectiva de tiro inducido funciona sin anomalías detectadas, manteniendo su lazo de control de presión estable, lo que indica que el sistema de evacuación de gases no constituye la causa principal del incremento térmico observado en el hogar (Gómez, Rojas & Martínez, 2020).

Figura 7.

Comportamiento temperatura promedio del hogar caldera 1 y 2.



Nota: Datos tomados del SCADA de la empresa durante la semana de la prueba diagnóstica.

Continuando con el sobrecalentador, no se identificaron fugas en el circuito de gases y el dámper opera bajo condiciones normales de modulación. Sin embargo, el monitoreo del

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

economizador no es posible, ya que no cuenta con una termocupla en servicio, donde la temperatura de referencia del agua de alimentación se obtiene del precalentador tomada de manera manual con una cámara termográfica (FLIR E6, FLIR Systems, Inc.). Esta práctica conlleva a una incertidumbre considerable debido a la distancia física de aproximadamente 18 metros de tubería sin aislamiento, lo que garantiza una pérdida de energía antes del ingreso a los economizadores (Smith & Van Ness, 2018).

Durante la inspección del sistema de alimentación de biomasa, se identificó que el ducto de ingreso a la caldera 2 presenta una inclinación aproximada de 45° . Esta condición geométrica limita el flujo gravitacional del material, lo que se refleja en una menor tasa de alimentación hacia la caldera, incluso ante incrementos en la apertura de la compuerta de distribución. Adicionalmente, dicha inclinación favorece la acumulación de biomasa, generando deslizamientos irregulares y propiciando la formación de obstrucciones, especialmente cuando el material presenta variaciones en su contenido de humedad. Esta situación requiere intervenciones manuales por parte de los operadores para restablecer el flujo de alimentación, evidenciando una limitación operativa del sistema.

En contraste, la caldera 1 cuenta con un ducto de alimentación de configuración vertical, en el cual no se han reportado problemas asociados a obstrucciones, de acuerdo con la información suministrada por el personal operativo. En la **Figura 8** se presenta una vista de los ductos de alimentación de ambas calderas, donde puede observarse la diferencia geométrica entre ellos: el ducto de la caldera 2 con la inclinación aproximada de 45° que dificulta el flujo de biomasa, frente al ducto vertical de la caldera 1 que permite una alimentación continua sin obstrucciones.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Figura 8.

Ductos de alimentación calderas de PPW.



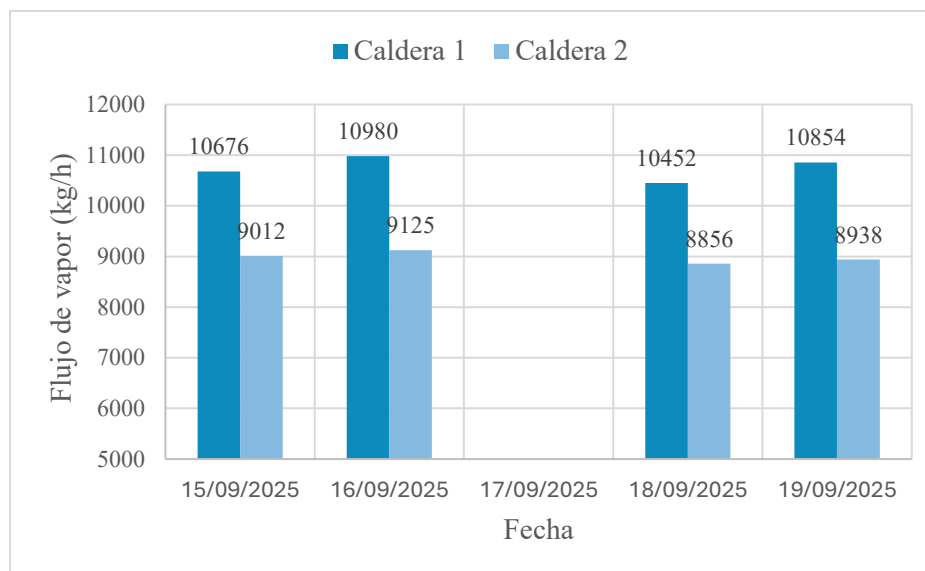
Nota: Fotografías tomadas en planta de la comparativa entre los ductos de alimentación de la caldera 1 y caldera 2 respectivamente.

Para finalizar, se graficaron los datos correspondientes a la semana de diagnóstico del flujo de vapor producido, obtenidos a partir del sistema de monitoreo SCADA. Por medio del análisis de estos registros, se evidencia que la caldera 2 presenta una producción promedio de vapor durante los días evaluados aproximadamente un 18 % inferior a la registrada por la caldera 1. En la **Figura 9** se presenta la comparación del flujo másico promedio producido por ambas calderas durante el período de diagnóstico, donde se observa claramente la diferencia señalada.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Figura 9.

Flujo másico producido en promedio por las calderas.



Nota: Datos tomados del SCADA de la empresa durante la semana de la prueba diagnóstica.

4.3 Estrategias de mejora para la caldera 2 basadas en el diagnóstico operativo

A partir del diagnóstico operativo realizado y del análisis del comportamiento de las variables críticas seleccionadas, se formularon dos tipos de estrategias de mejora. En primer lugar, se desarrollaron estrategias implementadas durante el transcurso del proyecto (corto plazo), las cuales consistieron en intervenciones directas sobre la operación de la caldera 2. Estas acciones fueron ejecutadas en coordinación con el personal de planta y su impacto fue evaluado mediante la comparación del comportamiento de las variables críticas antes y después de cada intervención, utilizando para ello herramientas estadísticas como los diagramas de caja y bigotes. En segundo lugar, se definieron estrategias propuestas a mediano y largo plazo, las cuales surgieron a partir de las limitaciones estructurales y operativas identificadas durante el diagnóstico. Estas propuestas, que requieren mayor planificación, inversión o programación dentro de los planes de

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

mantenimiento de la empresa, serán presentadas ante la dirección de planta como oportunidades de mejora viables para optimizar el desempeño futuro del sistema.

4.3.1 Estrategias implementadas

Durante la fase de diagnóstico, se identificó que la temperatura del agua de alimentación a la entrada del economizador se mantenía por debajo del valor requerido de 105 °C, lo que evidenciaba un aprovechamiento térmico deficiente en la etapa de precalentamiento.

Por ello, la transferencia de calor en el intercambiador se analizó mediante la ley de enfriamiento de Newton, la cual establece que el flujo de calor transferido depende del coeficiente global de transferencia de calor, el área de intercambio y la diferencia de temperatura entre los fluidos, expresada como:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde ΔT_{lm} corresponde a la diferencia de temperatura media logarítmica entre el vapor y el agua. En este contexto, una disminución en la temperatura de salida del agua indica una reducción en la diferencia de temperatura efectiva entre los fluidos o en la tasa de transferencia de calor. Bajo estas condiciones, el comportamiento observado sugiere una limitación en el suministro efectivo de vapor hacia el intercambiador, lo que reduce la capacidad de transferencia térmica hacia el agua de alimentación y, en consecuencia, su temperatura de salida, con el fin de restablecer el balance térmico del sistema y garantizar que el agua de alimentación alcanzara la temperatura de consigna, se implementó como acción correctiva la instalación de una válvula manual tipo globo en la línea de ingreso al tanque pulmón. Esta intervención permitió estrangular controladamente el flujo hacia el tanque, forzando una redistribución del vapor hacia los intercambiadores de calor y los radiadores de los ventiladores primarios. Como resultado, se incrementó el caudal másico de

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

vapor disponible para el intercambio y, por ende, la energía térmica transferida al agua, mejorando la eficiencia en el precalentamiento y favoreciendo la estabilidad operativa del sistema. En la **Figura 10** se presenta una fotografía de la válvula tipo globo instalada, donde se aprecia su ubicación en la línea de alimentación al tanque intermedio tipo pulmón, mientras que sus especificaciones técnicas se detallan en el **Apéndice D**.

Figura 10.

Válvula tipo globo instalada.



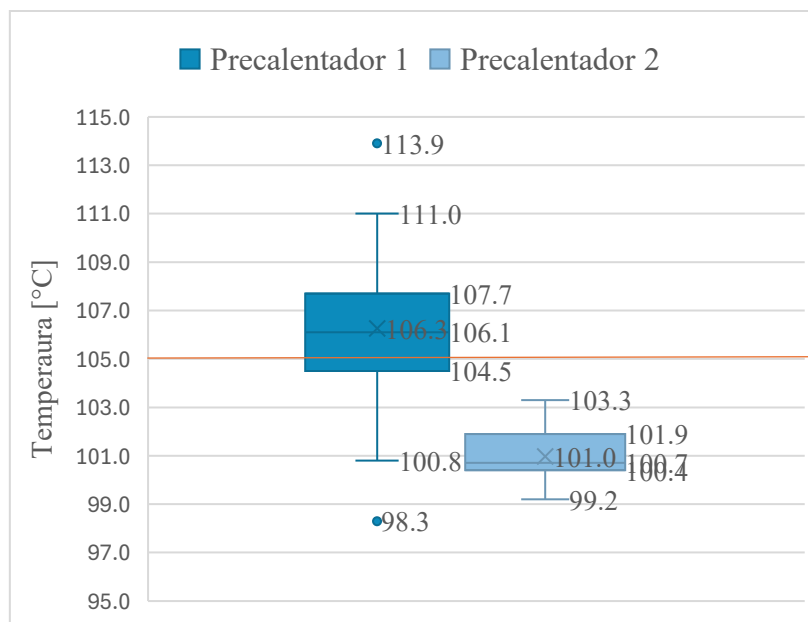
Nota: Fotografía tomada en planta de la válvula instalada a entrada tanque pulmón.

Posterior a la instalación de la válvula, se realizó un nuevo registro de las temperaturas de salida de los precalentadores con el fin de evaluar el impacto de la intervención. En la **Figura 11** se presenta el comportamiento de la temperatura registrada.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Figura 11.

Comportamiento temperatura salida de precalentadores después de la instalación de la válvula.



Tras la instalación de la válvula a la entrada del tanque pulmón ajustada al 50% de apertura, se evidenció un incremento significativo en la temperatura de salida de los precalentadores, lo que indica una mejora en la disponibilidad de vapor para el proceso de precalentamiento del agua. No obstante, el precalentador 2 continuó presentando temperaturas inferiores en comparación con el precalentador 1, sin alcanzar la establecida de 105 °C. Ante esta situación, se consideró la posible descalibración de la válvula o la presencia de una obstrucción en la entrada del fluido caliente al intercambiador. Estas hipótesis fueron evaluadas en conjunto con el personal de mantenimiento mecánico y eléctrico de la empresa, sin encontrarse evidencias de descalibración significativa ni de obstrucciones en la línea de ingreso de vapor.

Adicionalmente, durante la fase de diagnóstico se evidenció una modulación inadecuada de la válvula de control del precalentador 2, caracterizada por una respuesta errática que limitaba el suministro de vapor al intercambiador y, por ende, la transferencia de energía térmica al agua de

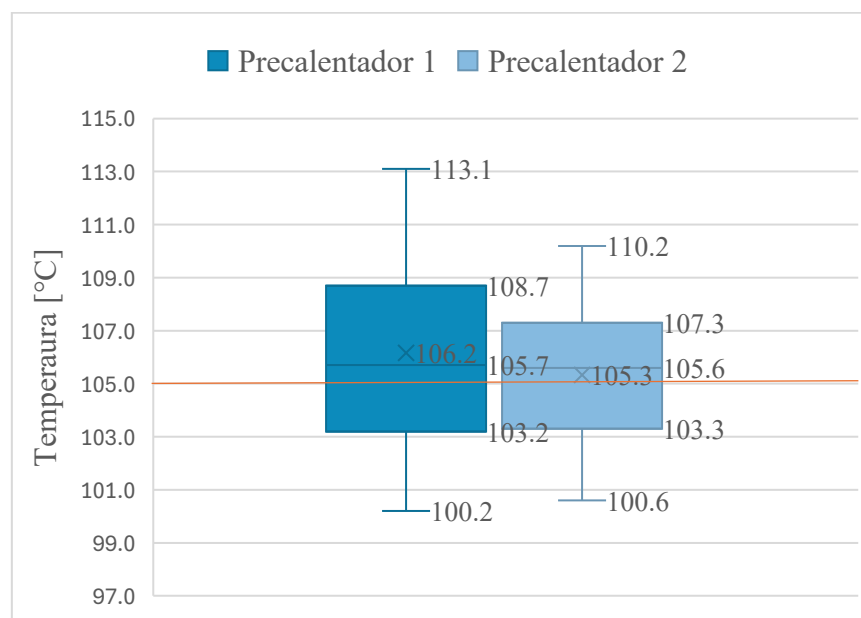
DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

alimentación. Ante esta condición, se realizaron ajustes en los parámetros del controlador PID mediante el procedimiento de autotuning en el PLC Siemens S7-1200, logrando una adecuada sintonización del sistema.

En la **Figura 12** se pudo observar que, tras la implementación de estos ajustes, se dio solución al inconveniente identificado, logrando que las válvulas respondieran de manera adecuada a la lógica de control establecida, facilitando el cumplimiento de las condiciones operativas requeridas y asegurando el cumplimiento de la consigna de temperatura a la entrada de la caldera 2.

Figura 12.

Comportamiento temperatura salida de precalentadores después del ajuste del controlador PID.



Como efecto directo de la restricción del flujo de vapor mediante la válvula instalada a la entrada del tanque pulmón, se evidenció un incremento en la disponibilidad de vapor hacia los radiadores de los ventiladores primarios de ambas calderas, al compartir éstos una línea común de

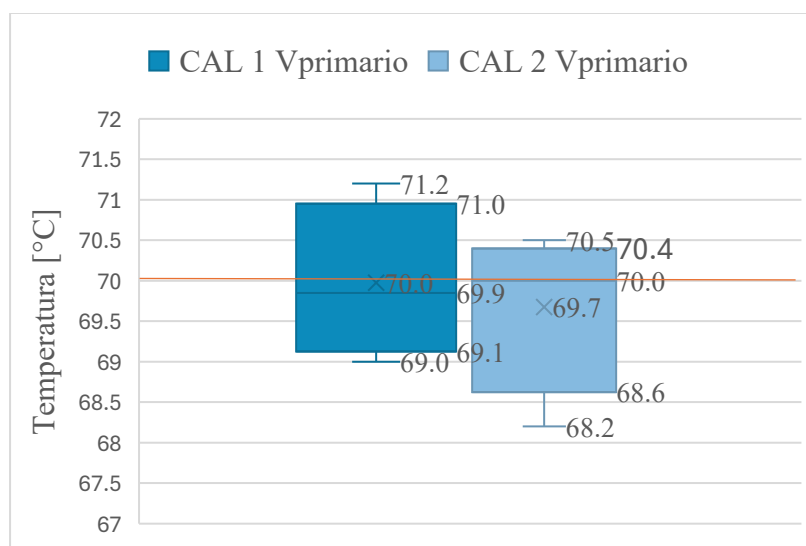
DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

alimentación. Esta condición favoreció un aumento en la tasa de transferencia de calor hacia el aire de suministro, lo que se tradujo en un incremento sostenido de la temperatura del aire primario ingresado al hogar de combustión. Complementariamente, se realizó el sellado con silicona de la compuerta de acceso para mantenimiento de los radiadores, con el objetivo de reducir las pérdidas térmicas hacia el ambiente y mejorar el aislamiento del ducto de aire primario.

En la **Figura 13** se presenta el comportamiento de la temperatura de entrada del aire del ventilador primario posterior a las intervenciones descritas, observándose un incremento sostenido respecto a los valores registrados durante la fase de diagnóstico. Este aumento evidencia una mejora en la efectividad de la transferencia de calor en los radiadores, lo que incide directamente en el acondicionamiento térmico de la mezcla aire-combustible y, por ende, en la estabilidad del proceso de combustión.

Figura 13.

Comportamiento temperatura entrada aire ventilador primario después del ajuste del controlador PID.



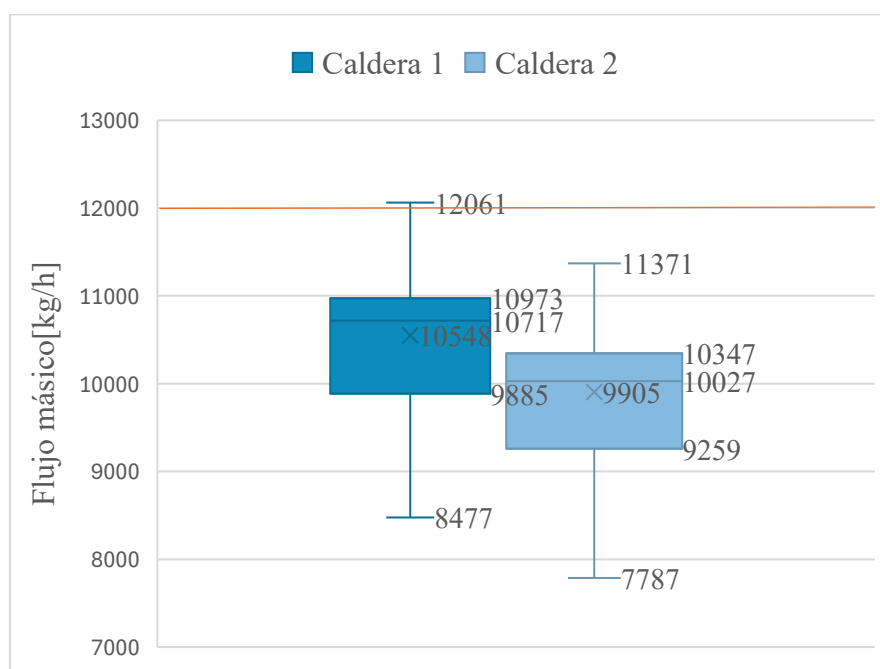
Como consecuencia de las mejoras implementadas, instalación de la válvula en la línea del tanque pulmón, ajuste de los lazos de control PID y sellado de los radiadores, se observó un impacto

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

positivo en la capacidad de generación de vapor de la caldera 2. En la **Figura 14** se comparó el flujo másico promedio de vapor producido por ambas calderas durante la fase de diagnóstico y posterior a las intervenciones. Lo anterior evidenció un incremento en la producción de vapor de la caldera 2 con respecto a su condición inicial, reduciendo la brecha existente frente a la caldera 1 y acercándose a los valores nominales de operación. Este comportamiento valida la efectividad de las estrategias aplicadas y es consistente con lo reportado en estudios sobre desempeño térmico y control de combustión en calderas de biomasa (Villegas, 2023).

Figura 14.

Flujo másico producido en promedio por las calderas después de las estrategias de mejora implementadas.



Para finalizar, una estrategia de mejora que se llevó a cabo durante la instancia de la práctica fue la integración de las señales correspondientes a la temperatura de salida de cada precalentador y a la apertura de las válvulas de fluido caliente al sistema SCADA de la empresa, las cuales previamente sólo se visualizaban en un display local instalado en el área de calderas, sin capacidad

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

de almacenamiento de datos. Para ello, se realizó el tendido de cableado eléctrico desde el monitor en planta hasta el cuarto de control, a una distancia aproximada de 70 m, permitiendo la transmisión continua de las señales. Esta intervención posibilitó la visualización en tiempo real de las variables en los monitores del cuarto de control, así como su registro histórico, facilitando el seguimiento del desempeño térmico de los precalentadores y la evaluación del comportamiento del sistema de control durante la operación.

4.3.2 Estrategia propuesta (mediano y largo plazo)

Las mediciones realizadas en la descarga del sinfín principal evidenciaron una distribución desigual de biomasa entre las calderas. En ambas jornadas evaluadas, la caldera 2 recibió una menor tasa de alimentación en comparación con la caldera 1. Específicamente, en la primera medición se registraron valores de 2528.7 kg/h para la caldera 1 y 1969.3 kg/h para la caldera 2, mientras que en la segunda medición se obtuvieron 2403.6 kg/h y 1755.6 kg/h, respectivamente ver **apéndice E**.

Con el fin de evitar la obstrucción de biomasa en la entrada de la caldera, se propone inicialmente como estrategia de mejora la instalación de vibradores industriales neumáticos en el inicio del ducto de alimentación, con el objetivo de impedir la formación de obstrucciones de material y favorecer el flujo continuo del combustible (fibra y cascarilla) hacia el sistema de combustión. Esta medida permitirá reducir la acumulación de biomasa en puntos críticos del ducto, mejorando la regularidad y continuidad del suministro de combustible.

Adicionalmente, se identifica como necesaria la corrección total de la inclinación del ducto de alimentación, la cual no obedece a un criterio de diseño del sistema de combustión, sino a restricciones de espacio derivadas de la distribución interna de la planta, donde las dos calderas se encuentran dispuestas en paralelo, limitando la posibilidad de disponer un ducto completamente

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

vertical para la caldera 2. La corrección de dicha inclinación mediante el traslado del sinfin secundario es técnicamente viable; sin embargo, representa una intervención de alta complejidad operativa, que, de acuerdo con la Dirección de Mantenimiento de la planta, podría requerir aproximadamente una semana de ejecución, considerando actividades de desmontaje, reubicación, alineación mecánica y pruebas de puesta en marcha.

No obstante, una vez implementada, esta configuración permitirá el libre ingreso de la biomasa hacia la cámara de combustión, corrigiendo esta acumulación de material en el punto de alimentación y asegurando que la biomasa sea adecuadamente captada y dispersada por el ventilador de inyección. Como resultado, se garantizará una alimentación de biomasa más uniforme y estable, equivalente a la que actualmente opera en la caldera 1, influyendo directamente en la relación aire/biomasa y favoreciendo una combustión más eficiente, controlada y confiable, con menor presencia de inquemados y mejor aprovechamiento energético del combustible. Adicionalmente, esta mejora contribuye a la reducción de riesgos operativos para el personal, al disminuir la necesidad de intervenciones manuales para desobstruir el ducto de alimentación.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

5. Conclusiones

Se identificaron las variables operativas críticas que afectan el rendimiento de la caldera de biomasa, destacándose la temperatura en los precalentadores, la temperatura del aire de ventilación primaria y el flujo másico de combustible, las cuales presentan una influencia directa sobre la eficiencia térmica y la generación de vapor del sistema.

El análisis del comportamiento de las variables operativas en la caldera 2 permitió evidenciar desviaciones respecto a los valores requeridos por el fabricante, particularmente en el sistema de precalentamiento, donde se registraban temperaturas inferiores a las esperadas. Asimismo, se determinó que la caldera 2 presentaba una producción de vapor aproximadamente 18% menor en comparación con la caldera 1, confirmando un desempeño operativo inferior.

La implementación de mejoras en el sistema de control y distribución de vapor, incluyendo la instalación de una válvula tipo globo y la sintonización del controlador mediante autotuning en el PLC Siemens S7-1200, permitió incrementar la temperatura del precalentador de 98.2 °C a 105.3 °C, así como mejorar la temperatura del aire de ventilación primaria y aumentar la producción de vapor de 8938 kg/h a 9905 kg/h, evidenciando la efectividad de las acciones correctivas aplicadas.

Se identificaron limitaciones en el sistema de alimentación de biomasa asociadas a la geometría del ducto de ingreso a la caldera 2, cuya inclinación favorece la formación de obstrucciones y afecta la continuidad del suministro de combustible, impactando negativamente el desempeño del sistema.

Con base en el diagnóstico realizado, se propusieron estrategias orientadas a mejorar la alimentación de biomasa, incluyendo la instalación de vibradores neumáticos y la modificación

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

geométrica del ducto, las cuales tienen el potencial de mejorar la estabilidad operativa y el desempeño térmico de la caldera a mediano y largo plazo

6. Recomendaciones

En función del diagnóstico operativo realizado y los resultados del estudio, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas para mejorar las condiciones operativas y de control del sistema de calderas de la empresa:

- Habilitar el sistema de limpieza de parrillas por inyección de vapor, con el fin de reducir la necesidad de intervenciones manuales por parte de los operarios durante la operación. Esto permite mejorar las condiciones de seguridad, garantizar la continuidad del proceso y mantener condiciones más estables de combustión al evitar acumulaciones excesivas de material en la parrilla.
- Aislar térmicamente la tubería con agua de precalentamiento que comunica los precalentadores con cada economizador, para reducir las pérdidas por transferencia de calor.
- Automatizar el sistema de purga de fondo de las calderas, incorporando el control del intervalo de purga y del tiempo de apertura de válvulas, para mantener una adecuada concentración de sólidos disueltos, prevenir incrustaciones y mejorar la eficiencia térmica del sistema.
- Verificar periódicamente la correcta medición y calibración de la instrumentación instalada en las calderas, asegurando la confiabilidad de los datos registrados.
- Fortalecer el monitoreo de variables críticas a través del sistema SCADA, permitiendo una supervisión continua del comportamiento del sistema y una respuesta oportuna ante desviaciones operativas.

Referencias bibliográficas

- Barrera, J. C., Ramírez-Contreras, N. E., & García-Núñez, J. A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Palmas*, 39(4), 24–XX.
- Boom-Cárcamo, E., et al. (2025). Scenario analysis of the use of oil palm residual biomass for bioenergy generation: A comparison with fossil fuels. *Energy*, 335, 137933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137933>
- Calderas de Biomasa VR. (2006). Manual caldera VR Ingeniería 12 Ton.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (4ª ed.). McGraw-Hill.
- Gómez, L., Rojas, F., & Martínez, J. (2020). Evaluación del desempeño térmico en calderas de biomasa para procesos industriales. *Revista Colombiana de Energía*, 7(2), 45–59.
- Hidayat, H., et al. (2024). Oil palm biomass ash removal for boiler fuel optimization: A case study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 101049.
- Hidayat, R. (2024). Effect of biomass washing on ash content and melting temperature in palm residues. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(6), 3059–3071.
- López, J. (2015). *Diagnóstico técnico y propuesta de control de calderas en plantas extractoras de aceite de palma* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia].

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Resolución 909 de 2008: Niveles permisibles de emisión atmosférica para fuentes fijas.

Ministerio de Trabajo. (2019). Guía técnica de inspección de calderas y recipientes sujetos a presión. <https://www.mintrabajo.gov.co/>

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2017). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons. <https://www.arma.org.au/wp-content/uploads/2017/03/Fundamentals-of-Engineering-Thermodynamics-by-Michael-J.Moran-Howard-N.-Shapiro.pdf>

Pérez Rodríguez, C. P., Ríos, L. A., Duarte González, C. S., Montaña, A., & García Marroquín, C. (2023). Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial. *Palmas*, 44(1), 65–82.

Prikhodko, E., Nikiforov, A., Kinzhibekova, A., Paramonov, A., Aripova, N., & Karmanov, A. (2023). Analysis of the effect of temperature on the ultimate strength of refractory materials. *Energies*, 16(18), 6732. <https://doi.org/10.3390/en16186732>

Ramos, E. (2021). Evaluación de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares mediante control de combustión. *Revista Ingeniería y Energía*, 12(3), 55–64.

Romeo, L. (2009). Analysis of fouling and slagging phenomena in biomass boilers. *Fuel Processing Technology*, 90(10), 1235–1242.

Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F., & Doyle, F. J. III. (2017). *Control automático de procesos* (4ª ed.). Limusa Wiley.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Shao, Y., Wang, J., & Zhang, J. (2012). Ash behavior during biomass combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5535–5544.

Smith, J. M., & Van Ness, H. C. (2018). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química* (8.^a ed.). McGraw-Hill Education.

Villegas, J. (2023). *Optimización energética mediante precalentamiento del aire de combustión en calderas pirotubulares* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia].

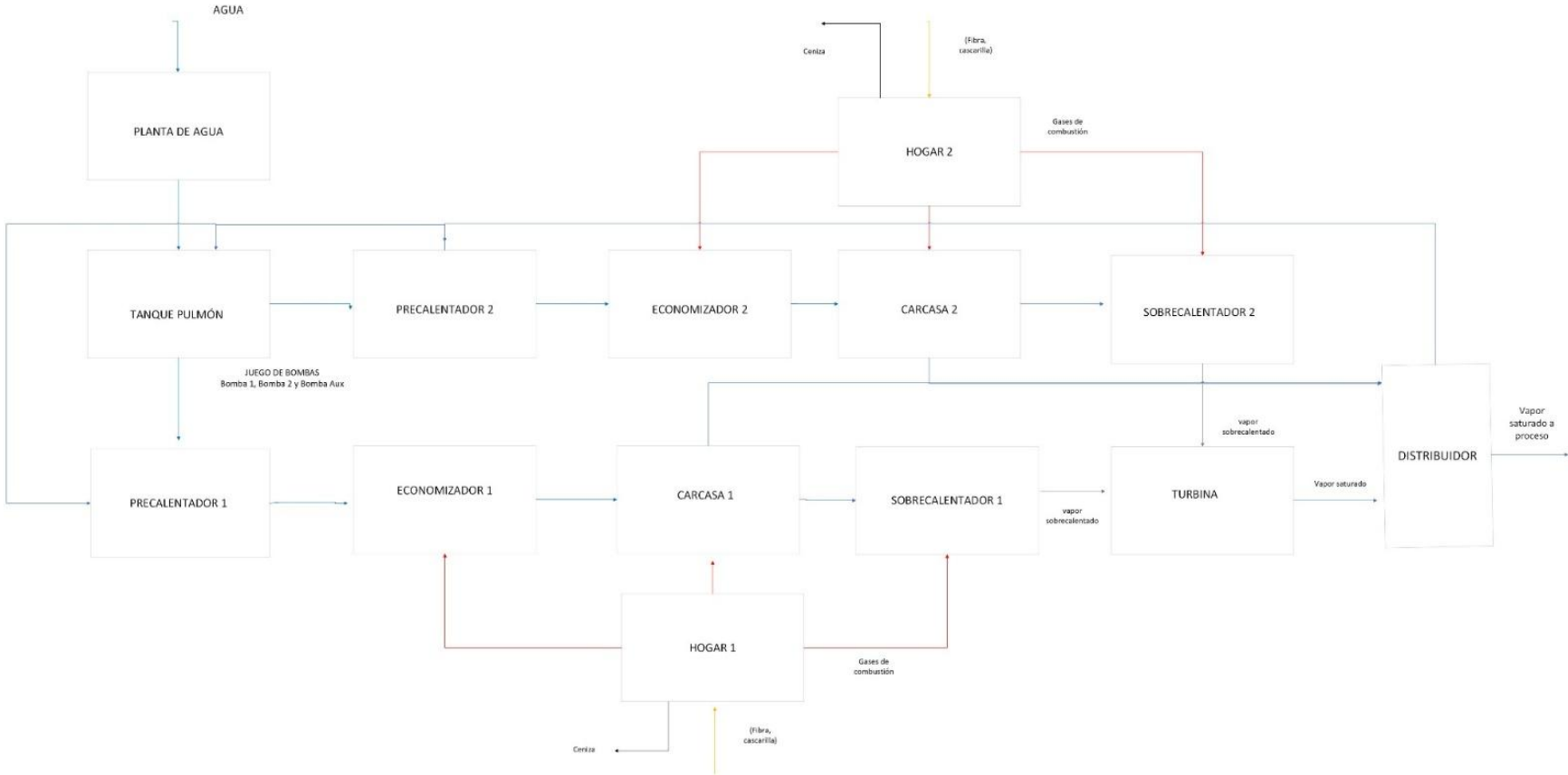
VR Ingeniería y Mercadeo S.A.S. (s. f.). *Calderas de biomasa*. <https://vringenieria.com/division-metalmecanica-2/calderas-de-biomasa/>

Wambeck, N., Bernal C., G. A., & Cala G., G. (2005). *Sinopsis del proceso de la palma de aceite*. Fedepalma, SENA, SAC.

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Apéndices

Apéndice A. Diagrama de bloque del sistema de calderas de PPW.



DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Apéndice B. Tablas seguimiento tratamiento agua para calderas.

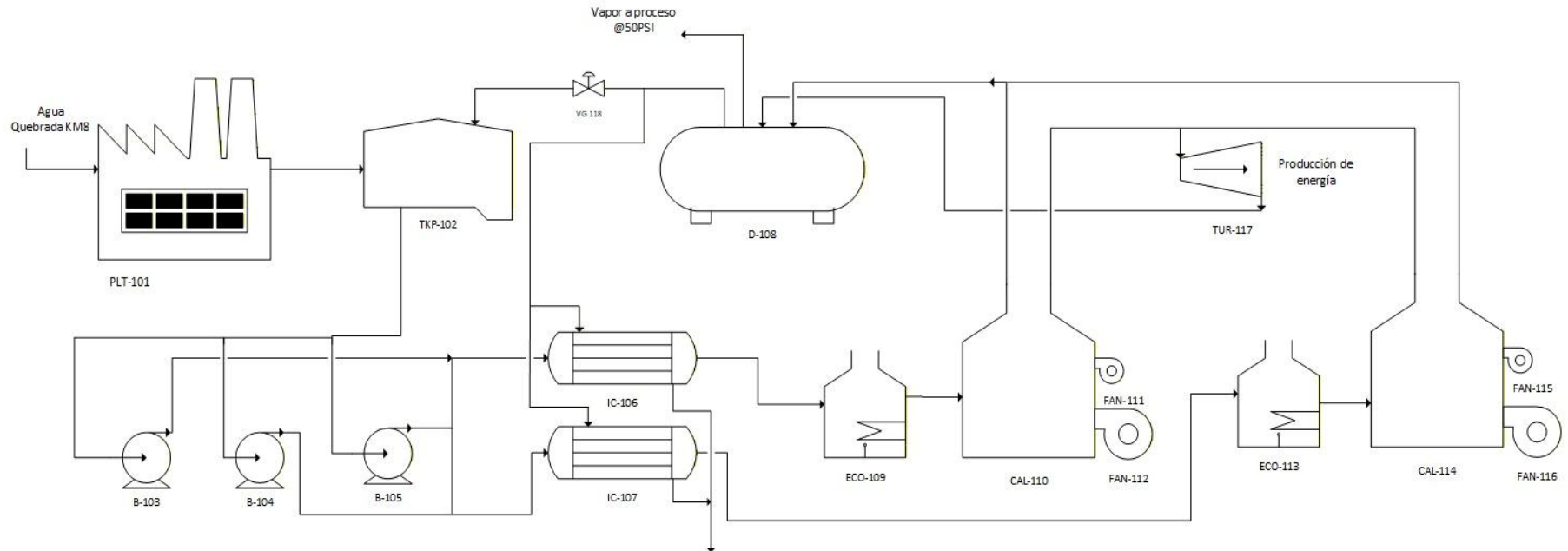
2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA										
ANÁLISIS	PARÁMETRO	ALIMENTACIÓN	PARÁMETRO	AGUA CARIF.	PARÁMETRO	FILTRADA	PARÁMETRO	SUAVIZADA	PARÁMETRO	POTABLE
PH	N.A		7.0 - 8.0	✓ 7,61	7.0 - 8.0		7.0 - 8.0		6.5 - 9.0	
DUREZA	N.A	7	N.A		N.A		0	0	<200ppm	✓ 0
HIERRO	N.A	0	< 0.7 ppm Fe	✓ 0	<=0.1 ppm Fe	✓ 0	<=0.1 ppm Fe ₂	✓ 0	<0.3ppm Fe	✓ 0
COLOR	N.A	315	< 30 UPICo	✗ 119	<=15 UPICo	✓ 54	<=15 UPICo	✗ 20	<15UPC	✗ 31
CONDUCTIVIDAD	N.A	42	N.A	46	< 100 us/cm	✓ 43	< 100us/cm	✓ 43	<1000 usc/cm	✓ 108
TURBIEDAD	N.A	32	<= 10 FAU (NTU)	✗ 14	<= 2 FAU (NTU)	✗ 9	<= 2 FAU (NTU)	✗ 3	<2 FAU (NTU)	✓ 0
COLORO	N.A		N.A		N.A		N.A		< 2.00ppm	

ANÁLISIS	PARÁMETRO	ALIMENTACIÓN	PARÁMETRO	CALD. VR 1	CALD. VR 2
PH	8.5 - 9.5		10.5 - 11.5		
DUREZA	< 0.5 ppm CaCO ₃	✓ 0	N/A		
SULFITO	N.A		20 - 40 ppm SO ₃	✓ 22,24	✓ 27,8
FOSFATO	N.A		4 - 15 ppm PO ₄	✓ 7,7	✓ 7,6
ALC FENOL	N.A		< 600 ppm CaCO ₃	✓ 213	✓ 213
ALC TOTAL	N.A		< 700 ppm CaCO ₃	✓ 286	✓ 292
HIERRO	< 0.1 ppm Fe	✓ 0	< 3.0 ppm Fe	✓ 0,03	✓ 0,3
SILICE	MAX 20 ppm SiO ₂	✓ 11	< 150ppm SiO ₂	✗ 190	✗ 180
OXIGENO	MAX 0,007 ppm O ₂		MAX 0,007 ppm O ₂		
CONDUCTIVIDAD	50 - 150 us/cm	✓ 71	500 - 1200 us/cm	✓ 1161	✓ 1105
TDS	25 - 75	✓ 35	250 - 600 ppm	✓ 580	✓ 551
TEMP	> 90°C	⚠ 83,7			

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Apéndice C. Diagrama de flujo sistema de calderas de la empresa.

PLT-101 Planta de tratamiento de agua para calderas.	T-102 Tanque Pulmón.	B-103 Bomba 1.	B-104 Bomba 2.	B-105 Bomba Auxiliar.	IC-106 Pre calentador 1.	IC-107 Pre calentador 2.	D-108 Distribuidor de Vapor Principal.	ECO-109 Economizador 1.	CAL-110 Caldera VR1.	FAN-111 Ventilador Secundario.	FAN-112 Ventilador Primario.	ECO-113 Economizador 2.	CAL-114 Caldera VR2.	FAN-115 Ventilador Secundario.	FAN-116 Ventilador Primario.	TUR-117 Turbina	VG-118 Válvula Globo Instalada
---	----------------------------	-------------------	-------------------	--------------------------	-----------------------------	-----------------------------	--	----------------------------	-------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	----------------------------	-------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--------------------	---





DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Apéndice D. Especificaciones técnicas válvula instalada.

Especificaciones técnicas – Válvula tipo globo KVC/GM	
Parámetro	Especificación
Tipo de válvula	Válvula tipo globo (Globe Valve)
Fabricante / Marca	KVC / GM Valves
Clase de presión	ANSI Class 150
Material del cuerpo	ASTM A216 WCB (acero al carbono fundido)
Tipo de conexión	Bridada (RF – Raised Face)
Norma de diseño	API 600 / ASME B16.34
Norma de bridas	ASME B16.5
Norma de pruebas	API 598
Presión máxima (38 °C)	19.6 bar
Temperatura de operación	Hasta ~400 °C
Tipo de operación	Manual o automatizada (según actuador)
Función principal	Regulación o estrangulamiento del flujo
Aplicaciones	Vapor, agua, aceite, procesos industriales
<i>Datos tomados de la ficha técnica dada por el fabricante</i>	

DIAGNOSTICO OPERATIVO CALDERA DE BIOMASA

Apéndice E. Datos medición alimentación de combustible a calderas.

		Registro biomasa suministrada.							
DIA	Prueba	Tiempo [h]	Masa [Kg]	Flujo Másico [kg/h]	Observaciones				
25/11/2025	Biomasa alimentación [ambas cerradas]	0.087	580	6666.666667	Trabajando a 4 prensas con alimentación de fibra y cascarilla	PRIMERA MEDICIÓN	Alimentación caldera [kg/h] 1	Alimentación caldera [kg/h] 2	
	Biomasa sobrante con [C1 abierta]	0.029	120	4137.931034			2528.735632	1969.256336	
	Biomasa sobrante con [C2, ambas abiertas]	0.083	180	2168.674699					
26/11/2025	Biomasa alimentación [ambas cerradas]	0.098	780	7959.183673		SEGUNDA MEDICIÓN	Alimentación caldera [kg/h] 1	Alimentación caldera [kg/h] 2	
	Biomasa sobrante con [C1 abierta]	0.036	200	5555.555556			2403.628118	1755.555556	
	Biomasa sobrante con [C2, ambas abiertas]	0.1	380	3800					