



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA

Estudio energético de la caldera acuotubular No 01, de tres domos superiores; para mejorar la eficiencia de cogeneración en Agroindustrial Pomalca

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Mecánico Electricista

AUTOR:

Liza Pisfil, José Alberto (orcid.org/0000-0002-7329-9950)

ASESOR:

Mg. Celada Padilla, James Skinner (orcid.org/0000-0002-5901-2669)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, transmisión y distribución.

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

CHICLAYO – PERÚ

2022

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, por su ayudarme a terminar mi carrera profesional, por ser mi guía espiritual.

A mí querida madre Clotilde, que, desde el cielo, me bendice en mí día a día, a mi amada esposa Clotilde, mis hijos Albert, Josselyn, Ashley; quienes son mi motor y motivo, para cumplir mis metas.

Agradecimiento

A mi padre celestial, que bendice mi familia, y nos cuida a diario.

A mi madre que desde el cielo me guía, a mi esposa e hijos, por su apoyo incondicional.

A mis amigos y jefes de trabajo, por su apoyo a lo largo de mi formación académica, y también por sus aportes a esta investigación.

A los docentes de esta casa de estudios por sus enseñanzas brindadas y en especial por su asesoría a este trabajo de investigación.

Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Indice de gráficos	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	6
III. METODOLOGÍA.....	13
3.1. Tipo y diseño de Investigación.....	13
3.2. Variables, operacionalización.....	13
3.3. Población, muestra y muestreo.....	14
3.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	14
3.5. Procedimientos.	16
3.6. Método de análisis de datos.....	17
3.7. Aspectos éticos	17
IV. RESULTADOS	18
V. DISCUSIÓN.....	47
VI. CONCLUSIONES.....	51
VII. RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS.....	55
ANEXOS	59

Índice de tablas

Tabla 2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	15
Tabla 3. Datos de operación de la Caldera No 01.....	20
Tabla 4. Estado actual de los equipos de la Caldera No 01.....	21
Tabla 5. Parámetros del agua de alimentación en las Calderas.	24
Tabla 6. Generación de vapor, cuatro Calderas en servicio.....	26
Tabla 7. Motores de la Caldera No 01.....	28
Tabla 8. Consumo de bagazo y producción de vapor Caldera No 01.	28
Tabla 9. Tabla comparativa eficiencia actual vs eficiencia con mejoras propuestas.	40
Tabla 10. Costos de materiales para la construcción del inyector secundario.	42
Tabla 11. Costos de alquiler de equipos para la construcción.	43
Tabla 12. Costos de mano de obra, construcción del inyector de aire.	43
Tabla 13. Costos de mano de obra, montaje del inyector de aire.	43
Tabla 14. Costo total de la implementación de mejora.....	44
Tabla 15. Costo de mantenimiento, inyector aire secundario.....	44
Tabla 16. Tabla análisis económico VAN, TIR, de la mejora propuesta.....	45
Tabla 17. Valor actual neto de la propuesta dada.	45

Índice de figuras

Figura 1. Caldera Piro tubular.	9
Figura 2. Caldera Acuotubular.....	9
Figura 3. Sistema de inyección aire secundario.	11
Figura 4. Diseño de ejecución para desarrollo de la investigación.....	16
Figura 5. Panel de control de la Caldera No 01.Pomalca.....	19
Figura 6. Tubería rota, banco convectivo frontal. Caldera No 01.	25
Figura 7. Proceso de cogeneración, Caldera No 01.....	30
Figura 8. Esquema balance energético actual caldera no 01.....	34

Indice de gráficos

Gráfico 1. Ingenios azucareros en el Perú.	8
Gráfico 2. Horas de trabajo vs tiempo perdido, año 2019	22
Gráfico 3. Causas de las horas perdidas.	23
Gráfico 4. Fallas mecánicas vs fallas operacionales.	24
Gráfico 5. Generación Calderas.	27
Gráfico 6. Generación de vapor Caldera No 01 -2019.	27
Gráfico 7. Eficiencia actual, eficiencia con mejoras en la Caldera No 01.....	41
Gráfico 8. Valor actual neto de la propuesta de mejora.	46

Resumen

Mediante la presente investigación, se realizará el estudio energético en un generador de vapor, con el objetivo de plantear propuestas de mejora, para revertir el estado actual de generación de vapor de la caldera acuotubular No 01, en el ingenio de Pomalca.

La problemática actual, es el bajo rendimiento del generador de vapor en estudio, debido a problemas en su banco de generación, la falta de equipos como inyector de aire secundario, sumado a la falta de mantenimiento en su infraestructura refractaria, produciendo pérdidas por aislamiento térmico en la caldera.

Se empezó por levantar registros documentarios, consultando con el equipo de mantenimiento, para revisar la ficha técnica de la caldera No 01, históricos de mantenimiento y operación, horas de trabajo, horas de parada por fallas, estado de los equipos, consumo de bagazo, consumo eléctrico de los equipos.

Posteriormente se procedió, a calcular la eficiencia actual de la caldera, utilizando dos métodos, el primero método directo; que es el resultado del total de la energía útil aprovechada en vapor, entre la energía liberada por el combustible, que en nuestro caso de estudio es el bagazo. También utilizamos el método indirecto, donde la eficiencia se hallará, a través de las pérdidas de la caldera, como: pérdidas por humedad en el combustible, pérdidas por gases secos, pérdidas por radiación, entre otras que se detallan en el desarrollo de este estudio.

Por último, dada la situación actual, se plantea mejoras en la caldera, como: cambiar el banco de tubos, implementar un inyector de aire secundario, y mejorar el aislamiento en la caldera. Gracias a estas mejoras la caldera lograra aumentar su eficiencia en un 8%.

Palabras clave: Caldera acuotubular, eficiencia, bagazo, inyector aire secundario.

Abstract

Through this research, the energy study will be carried out in a steam generator, with the aim of proposing improvement proposals, to reverse the current state of steam generation of the water-tube boiler No 01, at the Pomalca sugar mill.

The current problem is the low performance of the steam generator under study, due to problems in its generation bank, the lack of equipment such as a secondary air injector, added to the lack of maintenance in its refractory infrastructure, causing losses due to thermal insulation. in the boiler.

It began by raising documentary records, consulting with the maintenance team, to review the technical sheet of the boiler No 01, maintenance and operation history, working hours, stop hours due to failures, equipment status, bagasse consumption, electrical consumption of the equipment.

Subsequently, the current efficiency of the boiler was calculated using two methods, the first direct method; which is the result of the total useful energy used in steam, among the energy released by the fuel, which in our case study is bagasse. We also use the indirect method, where the efficiency will be found, through the losses of the boiler, such as: losses due to humidity in the fuel, losses due to dry gases, losses due to radiation, among others that are detailed in the development of this study.

Finally, given the current situation, improvements are proposed in the boiler, such as: changing the bank of tubes, implementing a secondary air injector, and improving the insulation in the boiler. Thanks to these improvements, the boiler will increase its efficiency by 8%.

Keywords: Water tube boiler, efficiency, bagasse, secondary air injector.

I. INTRODUCCIÓN

El sector azucarero sin duda alguna es uno de los eslabones principales en la cadena alimenticia a nivel mundial, donde el 70% de su obtención proviene de la caña de azúcar, con un aporte de 120 millones de ton de producción anual de azúcar doméstica.

Para la producción de azúcar, se necesita de vapor para realizar el proceso de cocimiento y obtención de azúcar y derivados, y lo más importante para generación de energía, para mover sus equipos dentro de la planta y en algunos ingenios venden energía al sistema interconectado. Los ingenios azucareros convencionales operan mediante un ciclo Rankin con vapor sobrecalentado, donde las calderas envían el vapor para mover las turbinas de contrapresión, donde su vapor de salida es empleado como energía térmica para realizar el proceso, actuando los condensadores a presión como consumidores.

En los ingenios azucareros existen muchas variables, una de ellas es las Calderas y combustibles utilizados para la generación y las condiciones de operaciones, este es el enfoque de esta investigación.

La variable mencionada es el punto de partida para la cogeneración en el ingenio, donde a partir de una misma fuente primaria (bagazo), se genera la producción secuencial de dos formas de energía, la motriz y térmica.

Las constantes crisis energéticas, obligaron a muchas industrias a buscar fuentes de generación alternativas a combustibles fósiles, siendo la cogeneración la que mayor desarrollo a conseguido.

Teniendo al bagazo a bajo costo y la posibilidad de diversificar las actividades comerciales, y en consecuencia la fuente de ingresos; la industria azucarera puso en primer plano la optimización termo energética, desarrollándose un amplio estudio en las calderas bagaceras a presiones y temperaturas altas.

En la actualidad el cambio climático es un tema que preocupa a las industrias en el mundo, el uso desmesurado de combustibles fósiles, para satisfacer los procesos industriales y la gran demanda de energía eléctrica, es un problema que ha obligado a las industrias a buscar nuevos métodos eficientes y menos

contaminantes para generar energía; dentro de ello la cogeneración en ingenios azucareros.

Sabemos que el azúcar es un producto indispensable en la alimentación mundial y es producido por 121 países con aporte que sobrepasa los 180 de toneladas anuales.

Conociendo el poder calorífico del bagazo, y teniendo una caldera muy eficiente acoplado a sus equipos de control de emisiones se podrá cogenerar aprovechándose la energía eléctrica para mover sus equipos y la energía térmica para sus procesos. De esa manera también se puede aportar energía al sistema interconectado tal es el caso de Brasil.

Contando con 388 plantas, Brasil es el mayor productor de energía de biomasa con base de caña de azúcar en Sudamérica, con valores alcanzados por encima de los 12 GW, de acuerdo con datos de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL). Representando el 7% de la capacidad total instalada en el país.

Gracias a este aporte, la cogeneración se convierte en tercera fuente más importante en Brasil, detrás de la hidroeléctrica con 62% y la del gas natural con 9%.

A pesar de las dificultades que el gigante de Sudamérica experimente a futuro, el bagazo tiene un potencial enorme, y se evidencia en Latinoamérica. La combustión del bagazo de azúcar es un medio eficaz para generar electricidad.

Se podría decir que la producción mediante esta fuente, es más predecible, considerándose intermitente, con el beneficio de estar concentrada en el llamado periodo de sequía, que es sumamente crítico para el sistema de generación eléctrica en ese país, además el beneficio de ser renovable y evitar emisiones de efecto invernadero.

En nuestro país el eslabón primario es constituido por los productores de caña de azúcar (MINAGRI 2019).

Actualmente en el país hay 14 ingenios azucareros, de los cuales Caña Brava, produce etanol. Si bien es cierto en las últimas décadas hubo un incremento de la producción azucarera mejorando la posición de varios ingenios, renovando sus

equipos y obteniendo nuevas tecnologías para cogenerar. Como es el caso de las agroindustrias en la región de La Libertad, Casagrande, Cartavio y Laredo que son las que más producen a nivel nacional.

Sin embargo, el otro lado de la moneda está en la región Lambayeque, las agroindustrias de Pucalá, Tumán, Pomalca, y Azucarera del Norte, siguen operando con tecnologías obsoletas, de épocas de las ex haciendas.

Estas agroindustrias tienen deficiencia en cogenerar no pudiendo satisfacer su propia demanda energética, sumado a ello la falta de política de gestión en mantenimiento y el impacto ambiental que causan sus sistemas de cogeneración.

El ingenio azucarero de Pomalca, ubicado en la región de Lambayeque, en el distrito de Pomalca. Cuenta actualmente con sistema de cogeneración de 4 Calderas acuatubulares modelo Sterling, con más de 70 años de antigüedad.

Una de las problemáticas que atraviesa el ingenio de Pomalca en su sistema de cogeneración, es la Caldera No 01, con una capacidad de diseño de 25 tn/h de vapor, sin embargo, la producción de vapor actual en el mejor de los casos está en 20 tn/h, con pérdidas significativas, causadas por diferentes factores que a continuación se describen.

Son varios factores en contra del buen funcionamiento de la Caldera, que hacen que los valores de generación sean bajos. Siendo uno de los principales la falta de mantenimiento y la poca inversión para implementar nuevos equipos con tecnologías de operación y control actuales.

El descuido en el banco de generación, al no contar con una planta de tratamiento de agua y el deterioro de las tuberías, la falta de equipos como inyección de aire secundario, para mejorar la combustión de la materia prima; un economizador para ahorrar bagazo, y la precariedad en su infraestructura refractaria; sumando los parámetros de operación como humedad y pol en el bagazo como combustible, el pH en agua de alimentación; hacen que la Caldera No 01 no esté generando lo suficiente como para satisfacer la demanda de vapor que necesitan los turbogeneradores y el vapor de escape para los procesos de cocimiento para obtener azúcar.

A lo largo del año 2019 la Caldera No 01, ha tenido constantes paradas, acumulando tiempos perdidos altos en comparación con las demás calderas, debido a los problemas ya mencionados, afectando directamente al suministro de vapor en consecuencia pérdidas en producción.

Presentada la problemática, formulamos el problema, con la siguiente pregunta: ¿Según el estudio energético de la Caldera No 01, y dadas las propuestas de mejora, en qué medida aumentará la eficiencia de cogeneración en Agroindustrial Pomalca?

Este estudio energético, se justifica técnicamente al lograr saber en qué estado se encuentra operando la caldera acuotubular de bagazo y rendimiento que estas tienen, desarrollando los cálculos, para poder encontrar en qué medida están siendo eficientes en el proceso de cogeneración.

Teniendo el estudio energético realizado, se plantearon medidas para mejorar el rendimiento de las calderas, que ha sido mermado por la falta de mantenimiento preventivo, aunado por la falta de inversión.

En cuanto a la justificación social, se enfocó el punto de la polución al ambiente de trabajo, que emiten las calderas, mediante este estudio se planteará mejoras en la combustión del bagazo, por lo tanto, que el trabajador tenga un entorno laboral mejor.

Po otro lado, se compartió e inculcó al trabajador a una cultura energética eficiente, ya que la parte operacional toma un lugar importante en la eficiencia de las calderas.

Con las mejoras presentadas del estudio energético de las calderas, se logró incrementar el rendimiento de los generadores, también se tendría mayor demanda de vapor para elaboración (purificación, cocimiento, cristalización), en consecuencia, agilizar el proceso de obtención del azúcar, justificando económicamente esta investigación.

En cuanto a la justificación ambiental, se plantearon acciones para mitigar las emisiones de CO₂ al medio ambiente, la polución de material volátil que afecta en primera instancia al trabajador y a los lugareños, y también a los equipos de la

planta dificultando su rendimiento operacional; mediante una buena combustión, aislamiento y hermeticidad de la caldera se logrará contrarrestar lo antes mencionado.

El objetivo general para esta investigación fue: realizar un estudio energético de la caldera acuotubular No 01, de tres domos superiores; para mejorar la eficiencia de cogeneración en Agroindustrial Pomalca, donde se desarrolló los siguientes objetivos específicos: diagnosticar el estado actual de la caldera No 01, de agroindustrial Pomalca; realizar los cálculos para encontrar el rendimiento energético actual de la caldera; presentar las mejoras en la caldera para aumentar su eficiencia; y por último se realizó una evaluación económica de las propuestas dadas.

Presentados los objetivos de esta investigación, se plantea la hipótesis; mediante el estudio energético de las calderas a bagazo y dada la propuesta de mejora, aumentará la eficiencia de cogeneración en Agroindustrial Pomalca.

II. MARCO TEÓRICO

Para el sustento de la presente investigación, existen varias investigaciones que argumentan el estudio energético de las Calderas en ingenios azucareros. A continuación, citaremos algunos proyectos:

En la tesis de Sierra (2005), titulada “Estudio de la eficiencia de combustión de la sala de calderas de la empresa REMAVENCA establecimiento Turmero edo. Aragua.”; menciona: Con la finalidad de generar soluciones tecnológicas en la empresa REMAVENCA establecimiento Turmero en el área de servicios de planta, mediante el desarrollo de investigaciones, proyectos y asistencia técnica se plantea el estudio y la evaluación técnico-económica de diferentes alternativas de última línea que permitan optimizar la operación de un generador de vapor (caldera) y de esta manera incrementar el rendimiento energético de la caldera.

Según Siquiná (2009), en su proyecto de investigación “estudio termodinámico, par mejorar la eficiencia operacional de un Ingenio”; menciona: En esta investigación se describe el proceso operacional, con la intención de encontrar la eficiencia de las calderas del ingenio, cuya infraestructura en sus hogares son de tipo Desctrick y tipo parrilla, se propuso la implementación de un economizador para la caldera No 02, donde ayuadar a reducir el consumo de comsbustible.

Por otro lado, Morales (2012); en su tesis “Estudio del generador de vapor No 2 en la central azucarero Majibacoa”; menciona: toda caldera, proporciona potencia de o calor para determinados procesos en las industrias, sus resultados economico dependen de la confiabilidad y rendimiento de los generadores de vapor.

Soza (2013), en su tesis “Estudio tecnológico de las Calderas No 6 y No 7 y sus equipos periféricos del Ingenio Monte Rosa en el periodo de zafra 2”; menciona: La presente evaluación en el área de generación de vapor del Ingenio Monte Rosa, tiene como propósito la necesidad de conocer el estado en el cual se encuentran operando sus equipos y su eficiencia total del sistema de generación, ya que presenta variaciones en el mismo, lo cual conlleva a un mayor consumo de energía eléctrica, vapor, agua, combustible, y personal para la operación de sus equipos.

También, Odar (2016), en su tesis; “auditoría energética para el caldera No 05 en el ingenio azucarero Pucala, para el año 2016, menciona que el equipo vital en un ingenio es los generadores de vapor, influyendo directamente en la producción de azúcar, para lograr los objetivos es necesario iniciar una auditoría in situ.

Llenera (2018), en su artículo titulado “análisis energético, de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo”; menciona: un sistema de cogeneración es el proceso de producción de energía combinada a partir de una única fuente de combustible.

Desde 1880, las industrias han optado por la cogeneración, cuando el vapor era la única fuente de energía, pero hoy en día aun desempeñan un papel importante en la generación de energía, por sus bajos costos de inversión, mantenimiento y operación de sus instalaciones y porque desde luego tienen menor impacto ambiental.

Ahora la tendencia energética en las industrias está orientada a uso y desarrollo de tecnologías eficientes y sostenibles; como generar su propia energía eléctrica a partir de recursos energéticos renovables o convencionales (RER), con único propósito de mitigar las emisiones de CO₂ y los efectos del cambio climático.

De todos los ingenios azucareros en el Perú, solo Paramonga, San Jacinto y Maple Etanol, aportan energía al sistema interconectado nacional (SEIN).

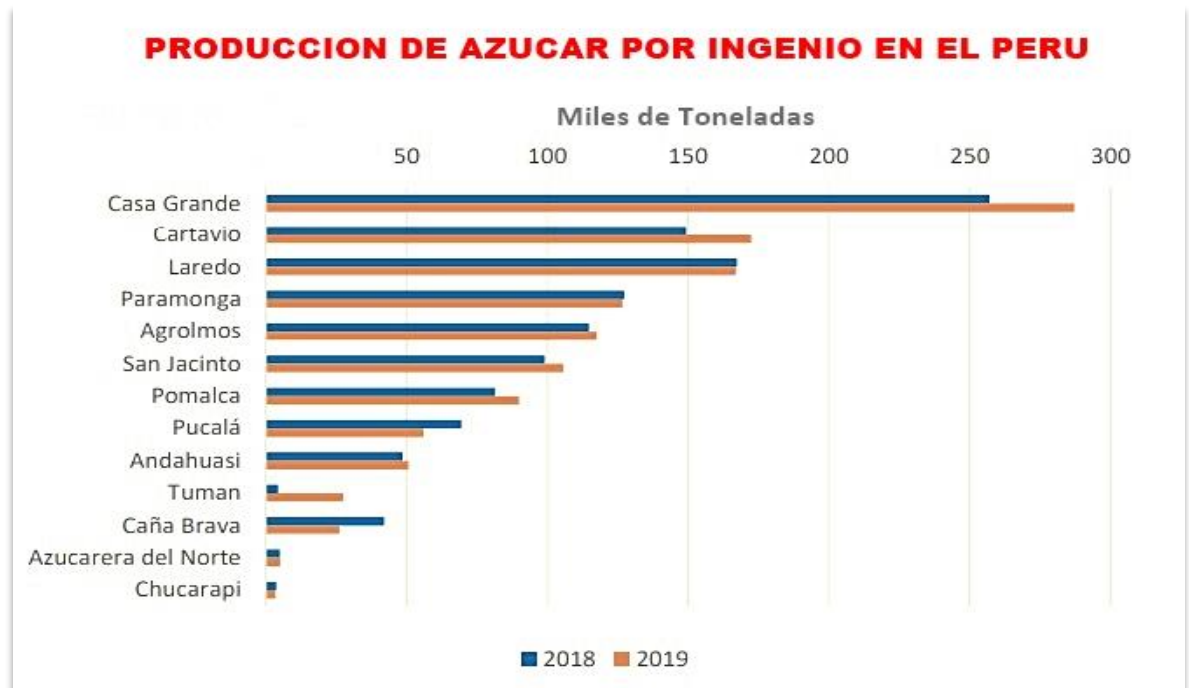


Gráfico 1. Ingenios azucareros en el Perú.

Fuente: Ministerio de agricultura del Perú – MINAGRI 2019

“La caldera, es una máquina termica, diseñad para la generación de vapor, mediante la transferencia de calor a presiones constantes, donde se claiente el liquido o fluido hasta cambiar de fase” (Vergara, 2008, p. 2).

La esencia en el funcionamiento de una caldera o generador de vapor, cuando se dispone la superficie de calor, de una amenera que pueda extraer el maximo obtenido del combustible y sus productos.

Estos generadores de vapor están divididos en dos tipos: pirotubulares, en este tipo de calderas el fluido en estado líquido esta en el recinto, y por sus tubos fluyen los gases a temperatura alta, provenientes de la combustión. Son de uso industrial con presiones de trabajo hasta 15 psi y 16 tn/h de vapor en generación.

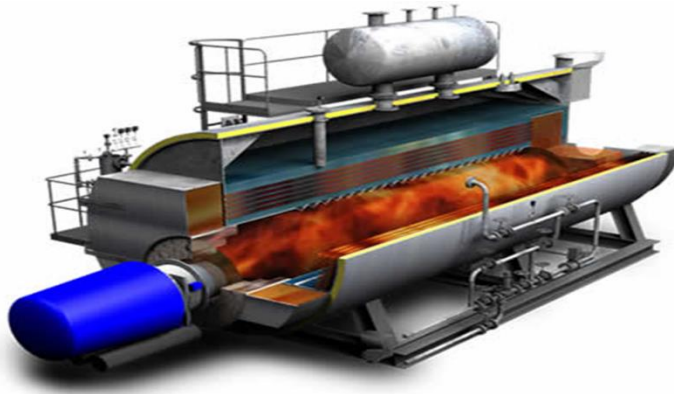


Figura 1. Caldera Piro-tubular.

Fuente: Manual de Calderas. Lawrence, 2000.

Las calderas acuotubulares, son aquellas que operan a lo contrario de las piro-tubulares, el liquido pasa por la tubería y los gases circulan por el exterior, producto de la combustión del combustible, estas calderas operan a altas presiones y temperaturas de trabajo.

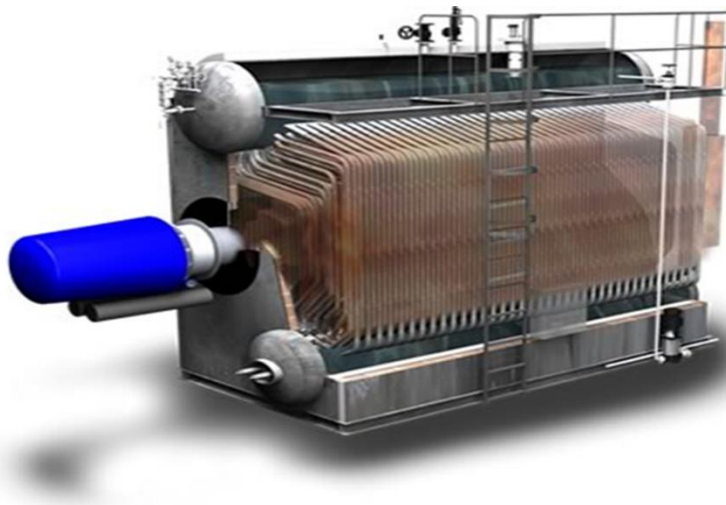


Figura 2. Caldera Acuotubular.

Fuente: Manual de Calderas. Lawrence, 2000.

Las partes principales de una caldera de vapor acuotubular, se detallan a continuación:

El hogar u horno, es la parte de la caldera, donde se produce la combustión del combustible para este caso de estudio es el bagazo, el objetivo principal de un horno es liberar la máxima cantidad de calor, operando a altas temperaturas.

Alimentadores de bagazo, pueden ser mecánicos o neumáticos. Su función es suministrar constantemente el combustible, dependiendo de la presión de caldera.

Paredes de agua, son superficies evaporativas que cubren parcial o totalmente la cubierta del hogar, están construidas de tubería, por donde fluye el agua. El uso de este equipo permite reducir las pérdidas de calor al exterior.

Haz convectivo o también llamado haz de tubos que conecta al domo superior con el inferior. Es también parte de las superficies evaporativas de la caldera.

El domo superior, separa el agua del vapor que sale de las superficies evaporativas. El domo inferior, sirve como colector-distribuidor.

El sobrecalentador, son equipos de intercambio de calor, instalados al paso de los gases calientes, construidos de tubería de espesor considerable, donde en su interior fluye el vapor sobrecalentado, con la intención de producir un vapor seco que se será enviada a la turbina.

El economizador, equipos encargado de aprovechar el calor de los gases de salida, también se les puede considerar como calentadores de agua, cuya función es elevar la temperatura de ingreso del agua. Construidos de tubería en forma de serpentines colocados a contracorriente de los gases de salida.

El precalentador de aire, también es un equipo de intercambio de calor, donde el aire primario a temperatura ambiente, que es ingresado a la caldera, pasa por un serie de tubería, colocadas a contracorriente de los gases, con la intención de precalentar el aire comburente que servirá para la combustión del bagazo.

El tiro forzado es un ventilador centrífugo cuya función principal es pasar el aire a temperatura ambiente a través del precalentador aprovechando los gases de combustión que se dirigen hacia la chimenea, ayudando notablemente al proceso de la combustión.

El ventilador tiro inducido, es el encargado de extraer los gases producto de la combustión, y realizar la transferencia de calor hacia los equipos de intercambio de calor.

La eficiencia de una caldera, depende de diferentes criterios como: el diseño de la caldera, combustible y las condiciones de operación; por otro lado los factores que influyen en la deficiencia de la caldera son: exceso de aire, temperatura de gases, combustion incompleta, operación.

Una de las mejoras como implementacion para una caldera acuatubular, es la instalación de aire sobre fuego, donde influye directamente en la turbulencia dentro de la cámara de combustión, siendo un factor muy importante en la combustion del bagao, permitiendo una mezcla más intima del combustible y aire, por otro lado permite mayor residencia en el horno.

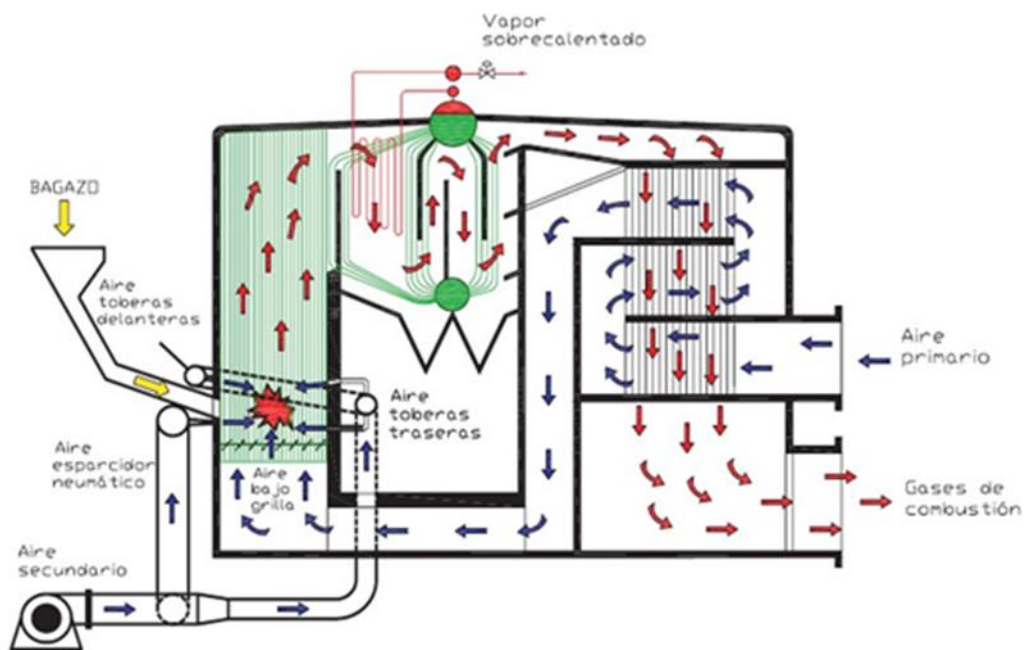


Figura 3. Sistema de inyección aire secundario.

Fuente: Golato, Aso, & Cárdenas, 2005

Se puede hallar la eficiencia de la caldera, mediante la energía ganada entre la energía cedida.

$$\eta = \frac{m_v * (\Delta h)}{m_c * PCI} * 100 = \%$$

Donde:

η = Rendimiento de la caldera %

m_c = Cantidad de combustible

m_v = Flujo másico de vapor

Δh = Diferencia de entalpías, vapor y agua

PCI = Poder calorífico del combustible

La eficiencia del combustible, incluye toda la energía que es absorbida por el fluido, como salida, pero solo se considera como entrada de energía química del combustible.

$$\eta_{combustible} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{E_{combustible}} = \%$$

El poder calorífico, es un parámetro, que cuantifica la energía térmica que se puede obtener en la combustión.

$$PCI = 17793.9 - (50.20 * s) - (203 * w) = [kJ/kg]$$

Donde:

w = Humedad en el bagazo

s = Pol o sacarosa en bagazo

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de Investigación.

Tipo de investigación: La investigación fue aplicada ya que se emplearon conocimientos adquiridos, para realizar un diagnóstico de la Caldera No 02, y encontrar mediante cálculos termodinámicos su rendimiento actual, permitiendo enfocar los puntos críticos para proponer mejoras para su eficiencia.

Diseño de la investigación: En este caso de estudio se consideró no experimental ya que se calculó el rendimiento de la Caldera No 02, con la recolección de datos y acontecimientos suscitados a diario en la operación de la caldera, donde permitió evaluar medidas para la mejora de su eficiencia, considerando que el objetivo de esta investigación fue realizar un estudio energético, con lo cual se determinó el rendimiento actual de la Caldera No 02 de tres domos superiores. Esta investigación es del tipo aplicada y descriptiva.

3.2. Variables, operacionalización.

Definición conceptual:

Variante independiente: Estudio energético de la caldera acuotubular No 01, de tres domos superiores.

Variable dependiente: Mejorar la eficiencia de cogeneración.

3.3. Población, muestra y muestreo

Población: Se tomó como población a la Caldera acuotubular No 01, con una presión de diseño de 30 bar.

- **Criterio:** Inclusión.

Muestra: Se consideró como muestra a la Caldera acuotubular No 01, de tres domos superiores.

Muestreo: El muestreo fue intencionado, ya que no se aplicó ninguna técnica estadística.

3.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Técnicas de recolección de datos: Para esta investigación, se utilizaron las siguientes técnicas realizadas en campo:

a.) Observación

- Se tomaron datos de planta de fuerza, temperatura, presión de vapor, presión de agua de alimentación, temperatura de gases de salida.
- Se observó la operación de la caldera y en qué estado se encuentra.

b.) Análisis Documentario

- Mantenimiento y operación de la Caldera.
- Datos técnicos de la caldera

Instrumentos de recolección de datos: Se utilizaron los siguientes instrumentos para esta investigación.

Guía de observación

- Análisis de gases a la salida (chimenea) de la Caldera No 01.
- Estado actual de los componentes y equipos que conforman la Caldera No 01.

a.) Ficha de investigación

- Histórico del mantenimiento programada a la Caldera No 01.
- Ficha técnica de los equipos de la Caldera No 01.
- Datos de laboratorio, del análisis del combustible de la Caldera No 01.
- Consumo de bagazo como combustible en la Caldera No 01.

Validez y confiabilidad:

a.) Validez: La presente propuesta en esta investigación es revisada por especialistas, por lo tanto expresa la correcta interpretación de los resultados obtenidos..

b.) Confiabilidad: Esta investigación obtuvo resultados coherentes y consistentes.

Tabla 1. *Técnicas e instrumentos de recolección de datos.*

TECNICA	INSTRUMENTO	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD
Observación	Guía de observación	Se observó el funcionamiento y operación de la caldera No 01, y se registró los parámetros reales de operación.
Análisis documentario	Ficha de investigación	Se analizó el registro documentario de la caldera No 01, el histórico de consumo de bagazo, generación de vapor y manteniendo.

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Procedimientos.

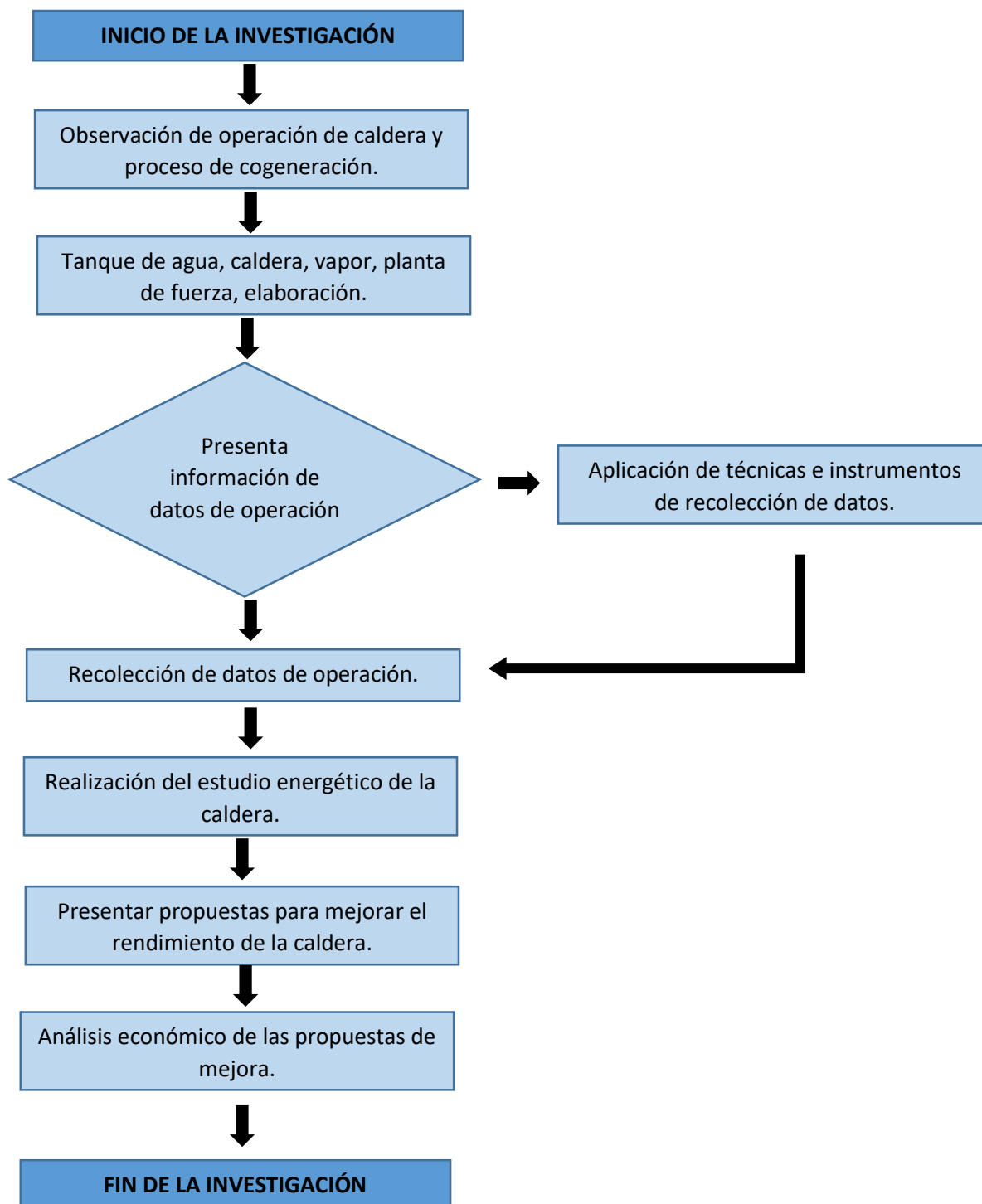


Figura 4. Diseño de ejecución para desarrollo de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Método de análisis de datos.

- Se tomó mediciones de la caldera acuotubular No 01, y se registraron en la hoja de datos, los valores de: presión de trabajo, temperatura de vapor, temperatura de los gases de salida en la chimenea, temperatura ambiental.
- Se recopiló información del cuerpo de mantenimiento del área, sobre el histórico de reparaciones fortuitas de la caldera No 01 y el tiempo perdido que estas generaron.
- Se tomaron nota del consumo de bagazo y la generación de vapor de la caldera en un determinado mes.
- Se aplicó estadística a los datos obtenidos para el estudio energético.
- Se calculará el rendimiento actual de la caldera No 01, y su aporte al sistema de cogeneración.
- Se presentará mejoras para mejorar el rendimiento de la caldera No 01, y el sistema de cogeneración.
- Se determinará el beneficio útil de las mejoras, mediante indicadores económicos, los cuales evaluarán el ahorro del bagazo como combustible.

3.7. Aspectos éticos

Se respetó la propiedad intelectual. Honestidad y la protección de la identidad de aquellos que aportaron y participaron en esta investigación.

IV. RESULTADOS

4.1 Diagnostico del estado operacional de la caldera No 01, de agroindustrial Pomalca.

4.1.1 Situación operacional de la Caldera acuotubular No 01.

Esta es la caldera de estudio, pertenece al tándem de calderas que encargadas de la generación de vapor en el Ingenio de Pomalca. Tiene una capacidad de diseño de 25 tn / h de vapor, la caldera No 01, trabaja en línea junto con las demás calderas, generando en promedio 77 tn / h de vapor que es la demanda para capacidad instalada de molienda 160 TCM /h.

Las calderas no cuentan con medidor de flujo de vapor, por lo que se calculara la generación total de vapor, tomando como referencia el consumo específico de los turbogeneradores.

La caldera No 01, no cuenta con inyección de aire secundario, es decir la combustión no tiene exceso de aire, tampoco tiene economizador; solo tiene un lazo de control de automático en la válvula de entrada de agua de alimentación manteniendo el nivel de agua en un 60 %.

Se consultó con el departamento de mantenimiento de calderas, para tener como referencia y base para los cálculos posteriores, la partida de la caldera o ficha técnica (anexada), donde describe los componentes de la Caldera No 01.

La caldera opera actualmente el 70% manualmente, solo tiene automatizada la alimentación de agua, cuenta con un panel HMID donde se aprecia el nivel de agua, también tiene dos niveles mecánicos donde el operador, puede constatar el nivel automático con el nivel mecánico. En la figura No 03, se muestra el panel de control automatizado de agua de alimentación de la Caldera No 01.

La alimentación del combustible (bagazo), se realiza mediante conductores de bagazo, quienes lo depositan en tolvas, y mediante compuertas accionadas manualmente por el operador, caen a los 3 hornos de herradura que tiene la caldera, el bagazo cae en forma de pila al centro del hogar donde es quemado, cuenta con un ventilador esparcidor de bagazo accionado por un motor de 5 hp.

La inyección de aire forzado, lo realiza el ventilador Tiro Forzado, accionado por un motor de 50 hp, y el encargado de extraer los gases que realizar la transferencia de calor al banco de convección, es el ventilado centrífugo Tiro Inducido, accionado por un motor de 150 hp.



Figura 5. Panel de control de la Caldera No 01. Pomalca

Fuente: Elaboración propia.

Se describe los datos de operación, en la tabla No 02, algunos datos son tomados dentro de los parámetros de diseño, ya que en la caldera no se cuenta con medidores de vapor, ni de temperatura, estos habrá que ser calculados posteriormente.

Tabla 2. Datos de operación de la Caldera No 01.

DATOS DE OPERACIÓN CALDERA No 01		
ITEM	PARÁMETRO	CANT / UNID
1	Presión de trabajo	30 kg f/cm ²
2	Vapor producido	24 tn/h
3	Temperatura de vapor	300 °C
4	Combustible	Bagazo
5	Temperatura del bagazo	30 °C
6	Temperatura de horno	750°C
7	Temperatura de aire	135°C
8	Temperatura de agua	90°C

Fuente: División de energía, departamento de Calderas - Pomalca

Junto con el personal de mantenimiento se realizó una inspección a la Caldera, y sus componentes, donde se pudo constatar el estado en que se encontraban operando, el tema de aislamiento actual es un punto en contra para el rendimiento de la caldera, las tuberías de agua de alimentación y de vapor no tienen aislamiento, y la mampostería en su estructura (paredes, hornos, ceniceros) es deficiente.

Otro punto importante es el tema de purgas, no cuenta con trampas de vapor, ni de purgas continuas, solo se tiene válvulas de compuerta que tienen pase, por sus años de trabajo sumado a la falta de manteamiento.

A continuación, se presenta en la tabla No 03, se describe los diferentes componentes de la caldera y se define su estado operacional; donde MB, es muy bueno, B es bueno, R es regular y D deficiente. Los cálculos posteriores que se efectúen para encontrar la eficiencia actual de la mano con esta evaluación servirán, para proponer las mejoras para incrementar la eficiencia de la Caldera.

Tabla 3. Estado actual de los equipos de la Caldera No 01.

ESTADO ACTUAL DE LOS EQUIPOS DE LA CALDERA No 01					
EQUIPO	COMPONENTES	ESTADO			
		MB	B	R	D
TIRO INDUCIDO	Ventilador			•	
	Motor		•		
TIRO FORZADO	Ventilador			•	
	Motor		•		
ESPARCIDOR DE BAGAZO - PUFF	Ventilador		•		
	Motor		•		
HOGARES	Mampostería Horno 1			•	
	Puerta Horno 1			•	
	Mampostería Horno 2			•	
	Puerta Horno 2			•	
	Mampostería Horno 3			•	
	Puerta Horno 3				•
SOBRECALENTADOR	Tubos		•		
	Colector		•		
CALENTADOR DE AIRE	Tubería			•	
	Placa		•		
BANCO DE CONVECCION	Tubos frontales				•
	Tubos centrales			•	
	Tubos posteriores		•		
DOMOS	Domo Frontal superior		•		
	Domo Central superior		•		
	Domo Posterior superior		•		
	Domo Inferior, lodos		•		
CENICERO	Mampostería			•	
COMPUERTAS ALIMENTACIÓN DE BAGAZO	Compuerta 1			•	
	Compuerta 2			•	
	Compuerta 3			•	
CHIMENEA	Estructura			•	
VALVULAS	Seguridad			•	
	Purgas			•	
	Principal vapor			•	
	Niveles		•		
	Agua de alimentación		•		
	Alivio		•		
	Sobre calentador		•		
	Manómetros analógicos		•		
AGUA ALIMENTACION	Tubería			•	
PAREDES	Mampostería				•

Fuente: Elaboración propia, departamento de Calderas - Pomalca

Se revisó el histórico de horas de trabajo mensual, para tener en cuenta cuales son las paradas frecuentes de la Caldera No 01, teniendo en cuenta que son 24 días de molienda y 6 días de reparación; pero la Caldera No 01 es la última en parar y la primera en arrancar, contando con 624 horas mensuales de trabajo sin tiempos perdidos.

En la figura No 08, se muestra las horas de trabajo y las horas de tiempo perdido de cada mes en el año 2019.

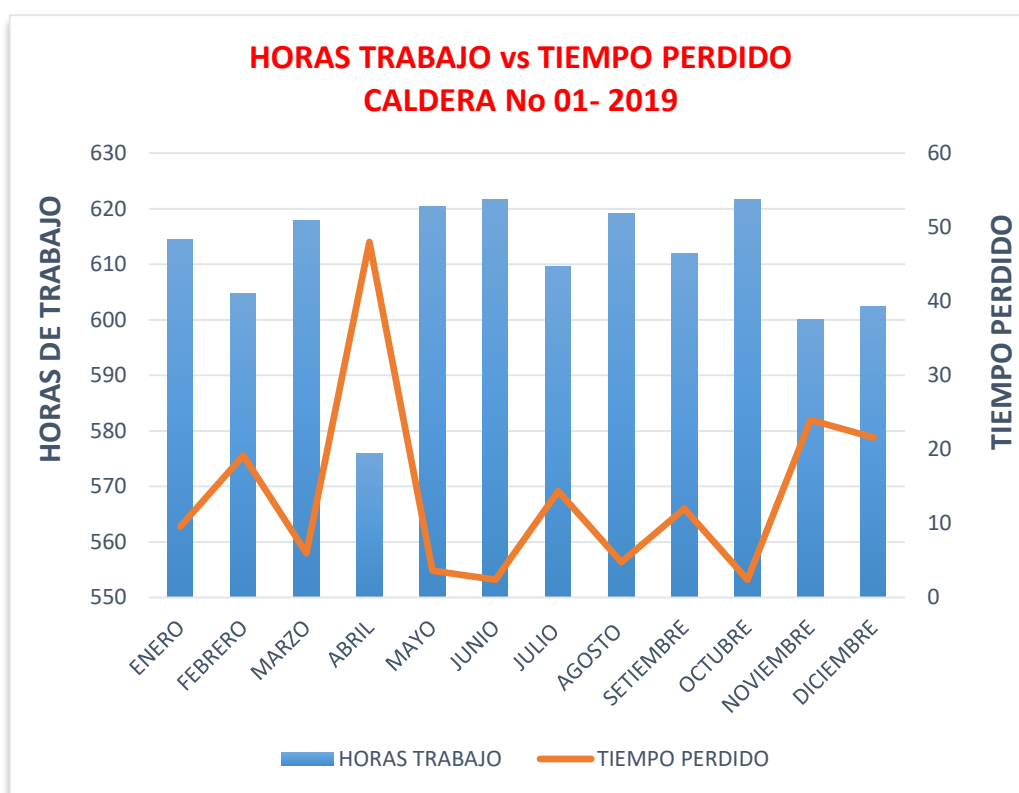


Gráfico 2. Horas de trabajo vs tiempo perdido, año 2019

Fuente: Departamento de mantenimiento – Sección Calderas, Pomalca

Elaboración propia

En el año 2019 la Caldera No 01, tuvo un total de 7320 horas de trabajo, teniendo un 2.24 % en pérdidas anuales, por eventualidades que se presentaron en operación por fallas en los equipos principales que obligan a sacar fuera de servicio la caldera para su revisión y mantenimiento correctivo. Estas horas perdidas, son la consecuencia del poco tiempo de mantenimiento que se emplea para reparar los

equipos críticos, sumado a la poca inversión que hay para repotenciar los equipos; en conclusión, no existe una gestión de mantenimiento.

Se describe detalladamente en la gráfica No 09, las causas de las horas perdidas de la caldera en el año 2019.

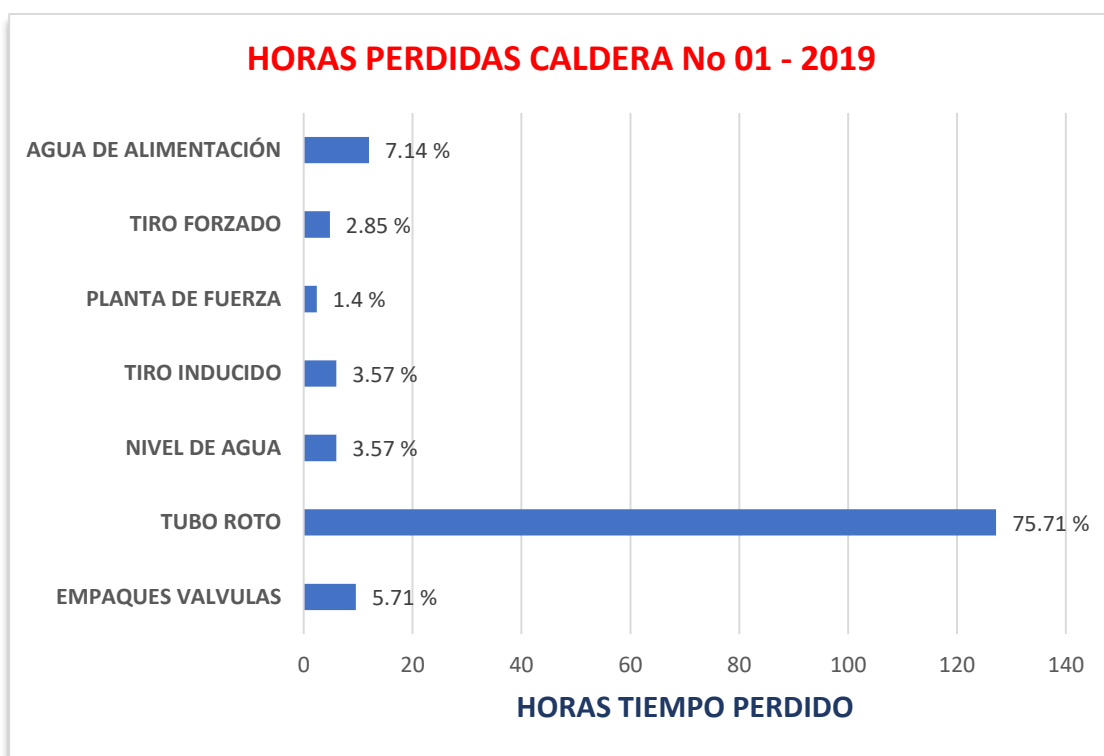


Gráfico 3. Causas de las horas perdidas.

Fuente: Departamento de mantenimiento – Sección Calderas, Elaboración propia

Se puede apreciar notablemente que la Caldera No 01, tiene problemas en su banco de tubos convectivos, debido a ciertos criterios:

- Incrustaciones, por sólidos depositados en el interior de los tubos. El agua para calderas está compuesta por condensados y agua tratada, en este ingenio no se cuenta con una planta de tratamiento de agua, el agua condensada obtenido en el proceso, muchas veces trae arrastres de sacarosa, en ocasiones hay deficiencia de condensados, alimentando de agua dura a la Caldera.
- Falta de mantenimiento en el haz convectivo, cambio de tubos y sondeo en cada reparación programada para eliminar incrustaciones, manteniendo las paredes internas del tubo limpias.

- El sistema de bombeo, en ocasiones suele fallar y dejar sin agua a la Caldera, afectando a los tubos incrustados.
- Otro factor importante es la parte operacional de la Caldera, en ocasiones falla el automático de alimentación de agua, perdiendo el nivel de agua.

Según el encargado del departamento de Calderas, las fallas de la Caldera que obligan a sacar fuera de línea la Caldera No 01, son por fallas mecánicas y falta de mantenimiento en un 80% (134.4 horas) y un 20% (33.6 horas) operacional.

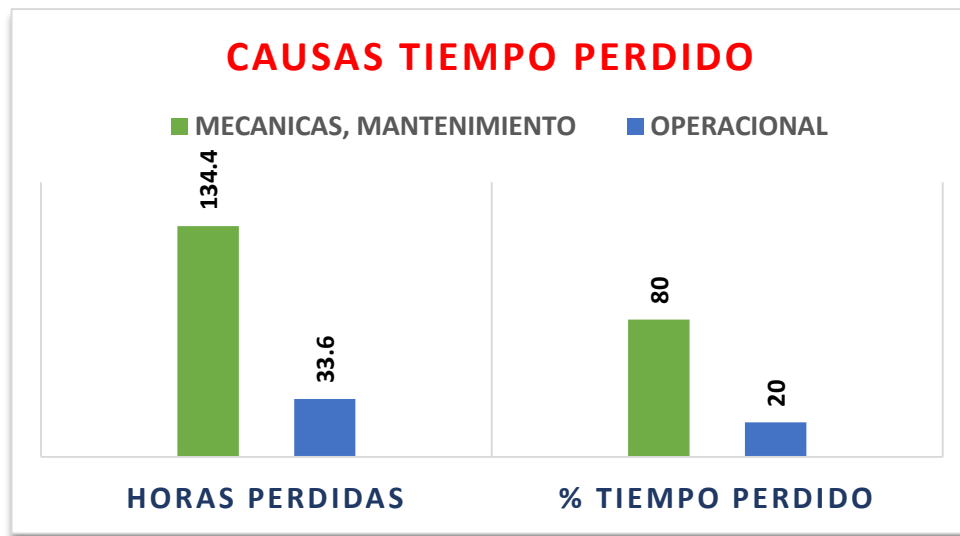


Gráfico 4. Fallas mecánicas vs fallas operacionales.

Fuente: Departamento de mantenimiento – Sección Calderas, Elaboración propia

En la siguiente tabla, se muestran los parámetros del agua de alimentación, en condiciones normales y óptimas de operación.

Tabla 4. Parámetros del agua de alimentación en las Calderas.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN			
PARÁMETROS	H ₂ O ALIMENTACIÓN	H ₂ O CALDERA	UNIDAD
pH	8.8	10.2	ppm
TSD	< 20	< 1200	ppm
Conduct SC	< 30	< 1500	μS/cm
Alcalinidad	-	< 200	ppm
Dureza	< 0.5	-	ppm
Materia Orgánica	< 0.2		ppm
SO ₃	-	< 8	ppm

Fuente: Alderetes, 2016.

Se consultó con el laboratorio del ingenio, para obtener datos del agua de alimentación; donde se analizan cada 4 horas las muestras de los tanques de agua condensada y las muestras de las purgas de los domos superiores en la caldera. La tabla No 06, describe los parámetros actuales del agua de alimentación de la Caldera No 01.

La caldera presenta ciclos de concentración muy bajos, solidos totales disueltos (TDS) muy por debajo de lo normal, esto se debe a que hay válvulas de purgas en mal estado donde se hay demasiada fuga de agua y vapor, o también se debe al mal estado de la tubería del banco convectivo, presentando fisuras en los tubos, por donde hay perdidas de vapor y agua.

En la figura No 11, se describe el estado actual del banco de tubos, de 3 1/4" de diámetro de la Caldera No 01; donde hay 55 tubos que están atorados producto de las incrustaciones de sólidos y 44 tubos donde las paredes están obstruidas y circula poco fluido en su interior.



Figura 6. Tubería rota, banco convectivo frontal. Caldera No 01.

Fuente: División de energía, departamento de mantenimiento Calderas - Pomalca

Se observó que los tubos frontales están en un estado deficiente, cabe resaltar que están ubicados por encima del horno de combustión llegando directamente la convección, porque las constantes paradas de la Caldera, se dan por tubos rotos

en esta zona. De un total de 585 de tubos en el haz convectivo, el 13.16 % están atorados y no realizan el proceso de ebullición, representando un de fice en su capacidad nominal de generación.

4.1.2 Flujo másico de vapor de la Caldera No 01

Según el encargado del departamento de calderas, la caldera en estudio, está generando de 17 tn/h de vapor; trabajando un 29,16 % menos de su capacidad nominal de generación. En el área de Calderas, no existen flujómetros de vapor, por lo que se consultó la data del vapor que se ingresa a la planta de fuerza. La tabla No 07, muestra la generación de vapor de las 4 calderas, como se mencionó trabajan en línea; el dato obtenido de la capacidad de generación está en función a los consumos específicos.

Tabla 5. *Generación de vapor, cuatro Calderas en servicio.*

GENERACIÓN DE VAPOR						
FECHA	Turbo No. 2	Turbo No. 4	vapor Reducción	Pérdidas (3 - 5) %	Total	Ton/h
01/10/2019	425.8	1180	160.58	72.261	1838.641	76.6100
02/10/2019	430.2	1200.1	163.03	73.3635	1866.6935	77.778
03/10/2019	428.9	1190.8	161.97	72.8865	1854.5565	77.273
04/10/2019	429.5	1189.5	161.9	72.855	1853.755	77.239
05/10/2019	430.2	1180.6	161.08	72.486	1844.366	76.848
06/10/2019	431.1	1188.3	161.94	72.873	1854.213	77.258
07/10/2019	425.7	1190.3	161.6	72.72	1850.32	77.096
08/10/2019	427.3	1180.9	160.82	72.369	1841.389	76.724
09/10/2019	429.6	1186.3	161.59	72.7155	1850.2055	77.091
10/10/2019	430.5	1190.6	162.11	72.9495	1856.1595	77.339
11/10/2019	429.8	1189.6	161.94	72.873	1854.213	77.258
12/10/2019	430.9	1187.6	161.85	72.8325	1853.1825	77.215
13/10/2019	427.9	1181.2	160.91	72.4095	1842.4195	76.767
14/10/2019	428.9	1180.9	160.98	72.441	1843.221	76.805
15/10/2019	429.4	1190.9	162.03	72.9135	1855.2435	77.301
TOTAL, DE GENERACIÓN PROMEDIO (tn vapor / h)						77.107

Fuente: División de energía, Planta de Fuerza, Pomalca. Elaboración propia

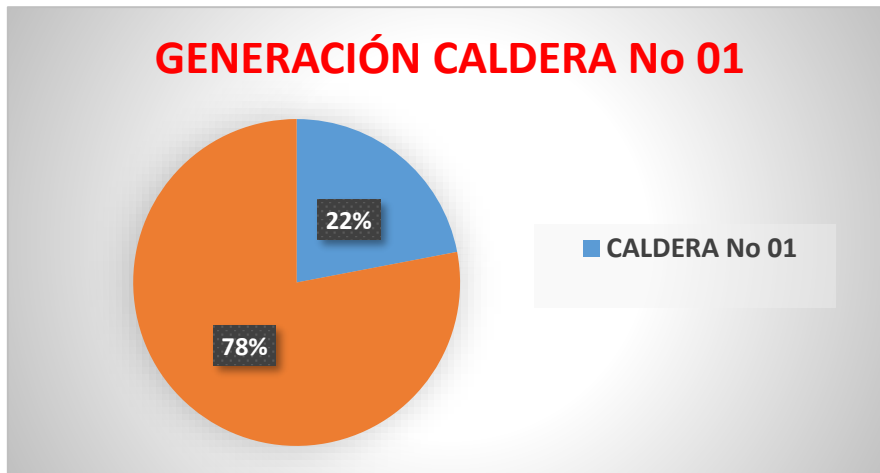


Gráfico 5. Generación Calderas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la gráfica No 13, la Caldera No 01, participa aportando un 22% de vapor, para la generación eléctrica y energía térmica para el proceso.

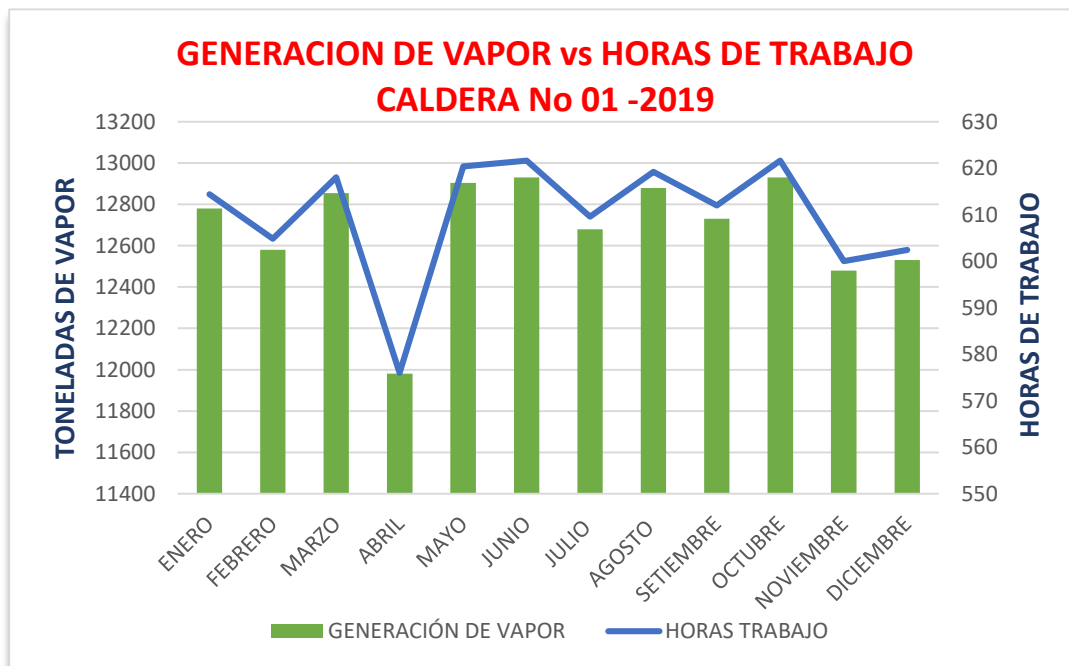


Gráfico 6. Generación de vapor Caldera No 01 -2019.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante las horas de trabajo que obtuvimos y sabiendo el flujo másico de vapor, la caldera produjo 152256 tn de vapor en el año 2019. En la gráfica No 14, detalla las horas de trabajo y la generación de vapor.

4.1.3 Consumo de energía de la Caldera No 01

Se detalla los motores para los diferentes equipos de la Caldera, también el consumo de energía durante los meses del año 2019. El consumo de energía se incrementa debido a la antigüedad de sus motores y la falta de mantenimiento, sumado a ello, la polución y ceniza que cae a los equipos; debido a la falta de aislamiento y hermeticidad de la caldera. Todo esto hace que los motores trabajen con amperajes en ocasiones por encima del nominal, produciendo desenganches, y en consecuencia una parada de la Caldera.

Tabla 6. Motores de la Caldera No 01.

RELACIÓN DE MOTORES CALDERA No 01				
MOTORES CALDERA No 01	HP	AMPERAJE	VOLTAJE	RPM
Tiro Inducido	150	189	440	900
Tiro Forzado	50	65	440	865
Bomba agua de alimentación	250	305	440	3500
Esparcidor de Bagazo	5	7	440	890
Compuerta de Bagazo No 01	1	0.5	220	1800
Compuerta de Bagazo No 02	1	0.5	220	1800
Compuerta de Bagazo No 03	1	0.5	220	1800

Fuente: División de energía, departamento de Calderas – Pomalca.

4.1.4 Consumo de combustible de la Caldera No 01

A continuación, se muestra el consumo de bagazo, y la producción de vapor, según la data histórico del departamento de Calderas en el mes de octubre, donde se registró el menor tiempo perdido.

Tabla 7. Consumo de bagazo y producción de vapor Caldera No 01.

PRODUCCION DE VAPOR vs CONSUMO DE BAGAZO			
FECHA	CONSUMO DE BAGAZO tn / h	PRODUCCION DE VAPOR tn / h	INDICE DE GENERACION tn vapor / tn bagazo
01/10/2019	9.3407	17.1080	1.82
02/10/2019	9.3923	17.0140	1.81
03/10/2019	9.3923	17.0140	1.81

04/10/2019	9.4444	16.9200	1.8
05/10/2019	9.4444	16.9200	1.8
06/10/2019	9.4444	16.9200	1.8
07/10/2019	9.4972	16.8260	1.79
08/10/2019	9.6045	16.6380	1.77
09/10/2019	9.5506	16.7320	1.78
10/10/2019	9.6045	16.6380	1.77
11/10/2019	9.7143	16.4500	1.75
12/10/2019	9.7143	16.4500	1.75
13/10/2019	9.6045	16.6380	1.77
14/10/2019	9.6591	16.5440	1.76
15/10/2019	9.6591	16.5440	1.76
16/10/2019	9.6045	16.6380	1.77
17/10/2019	9.7143	16.4500	1.75
18/10/2019	9.7701	16.3560	1.74
19/10/2019	9.7701	16.3560	1.74
20/10/2019	9.7143	16.4500	1.75
21/10/2019	9.6591	16.5440	1.76
22/10/2019	9.7143	16.4500	1.75
23/10/2019	9.6591	16.5440	1.76
24/10/2019	9.6045	16.6380	1.77
25/10/2019	9.7143	16.4500	1.75

Fuente: División de energía, departamento de Calderas – Pomalca. Elaboración propia

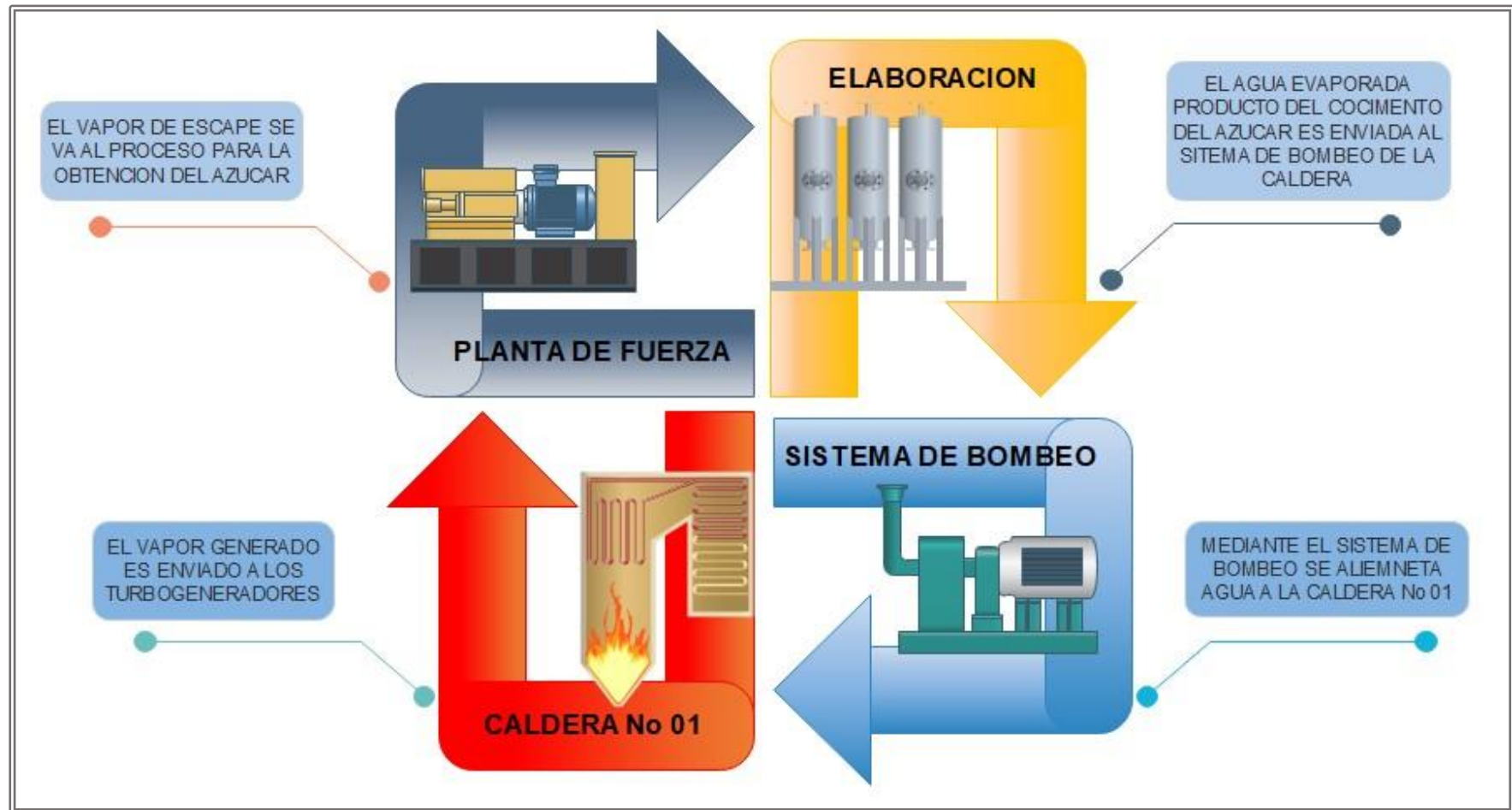


Figura 7. Proceso de cogeneración, Caldera No 01.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Realizar los cálculos, para encontrar el rendimiento energético actual de la caldera.

4.2.1 Cálculo de la energía liberada en la combustión por unidad de masa

Esta energía está determinada directamente por el PCI y PCS, en el caso del bagazo depende de la cantidad de humedad y Pol que contenga, tomaremos los valores promedios de la tabla No 09.

Cálculo del poder calorífico inferior - PCI

$$PCI = 7650 - (13.5 * s) - (87.3 * w) = [kJ/kg]$$

Donde:

w = Humedad en bagazo 50 %

s = Pol en bagazo 3.1 %

$$PCI = 13569.33 [kJ/kg] \approx 3243.15 [kcal/kg]$$

Cálculo del poder calorífico superior – PCS

$$PCS = 8280 - 13.5 * w - 82.8 * s = [kcal/kg]$$

$$PCS = 4098.15 [kcal/kg] \approx 17146.66 [kJ/kg]$$

4.2.2 Flujo másico, volumétrico de aire y de los gases de combustión

$$G_a = G_{ar} * m_{cb} = 28.54 [tn \text{ aire}/h]$$

$$V_a = V_{ar} * m_{cb} = 21.38 [m^3 \text{ aire}/h]$$

Donde:

G_a = Flujo másico del aire

G_{ar} = Peso del aire 3.056 kg aire / kg bagazo

V_a = Flujo volumétrico del aire

V_{ar} = Volumen del aire 2.289 Nm³ gases/kg bagazo

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera 9.34 tn/h

$$G_g = G_{gh} * m_{cb} = 36.51 [tn \text{ gases}/h]$$

$$V_g = V_{gh} * m_{cb} = 30.72 [m^3 \text{ gases/h}]$$

Donde:

G_g = Flujo másico de los gases de salida tn/h

G_{gh} = Peso de los gases húmedos 3.909 kg gases / kg bagazo

V_g = Flujo volumétrico de los gases de salida tn/h

V_{gh} = Volumen de los gases húmedos 3.290 m³ gases/kg bagazo

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera 9.34 tn/h

4.2.3 Calculo del rendimiento de la Caldera No 01 por método directo

Para encontrar el rendimiento de la Caldera se necesitó saber el total de calor aprovechado en la generación.

Calor total aprovechado

$$Q_a = m_v * (h_v - h_w) = 44599 [kJ / h]$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor 17 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado, a una temperatura de 300 °C y una presión de trabajo de 28 kg/cm² = 3000.51 kJ/kg

h_a = Entalpia de agua de alimentación entrando al domo a una temperatura de 90 °C = 377.04 kJ/kg

Rendimiento actual de la Caldera

$$\eta = \frac{Q_a}{m_c * PCI} * 100$$

Donde:

Q_a = Calor total aprovechado 44599 kJ/h

PCS = Poder calorífico superior del bagazo 17146.66 kJ/ kg

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera 9.34 tn/h

Entonces el rendimiento actual por el método directo de la Caldera es:

$$\eta = 0.27 \approx 27 \%$$

4.2.4 Esquema energético de la caldera acuotubular No 01.

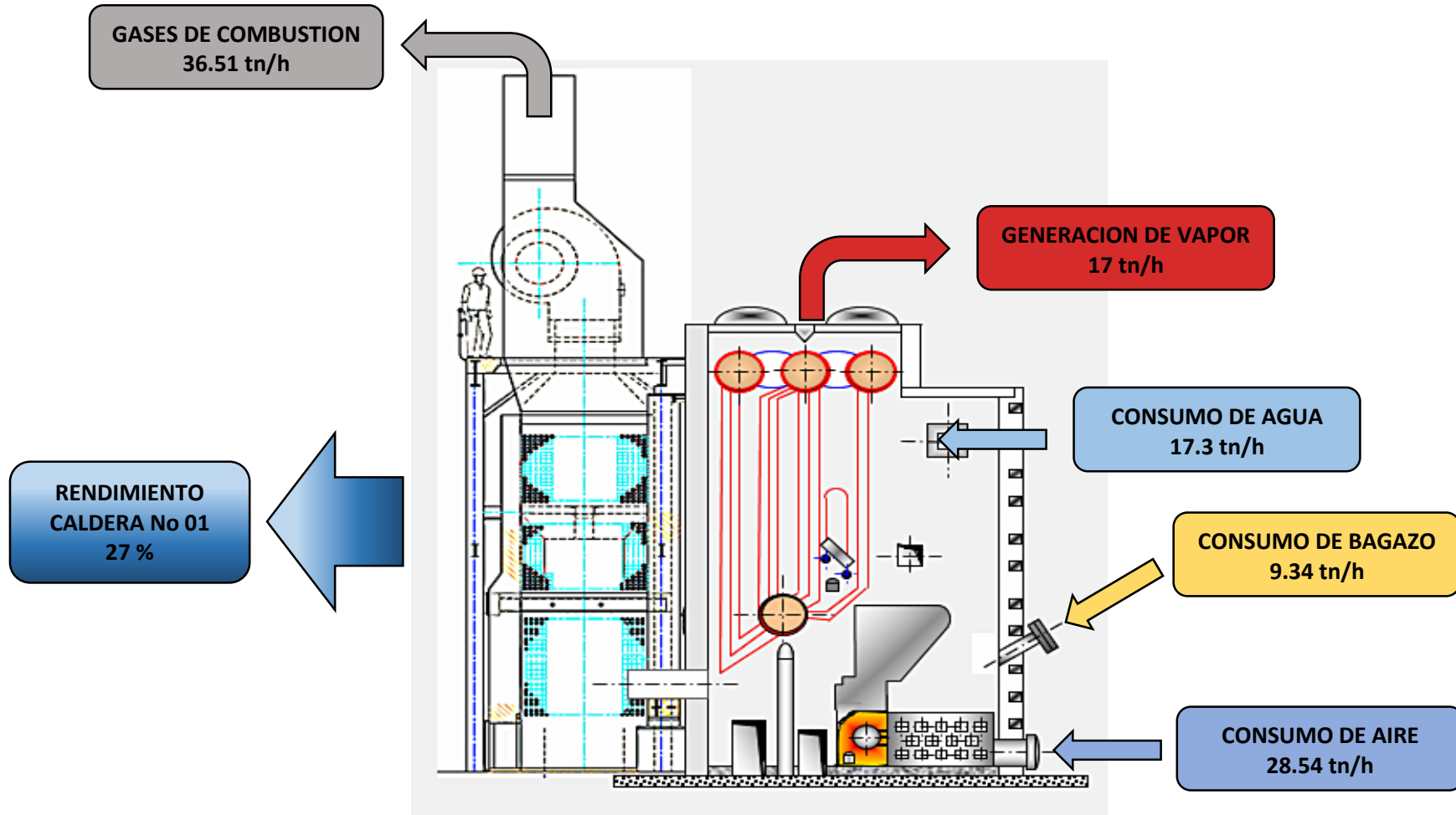


Figura 8. Esquema balance energético actual caldera no 01

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Proponer mejoras en la caldera para aumentar su eficiencia

Después de realizar el balance energético de la Caldera No 01, existe una deficiencia en la combustión del bagazo. A continuación, se presenta una propuesta la mejora de la eficiencia actual de la caldera.

4.3.1 Propuesta inyección de aire secundario

Se necesita realizar algunas modificaciones en la Caldera No 01, ya que aumentara el flujo de aire y flujo de gases. Se opta por adicionar un 50 % de exceso de aire, por lo el exceso de aire será de 1.50.

4.3.1.1 Flujo másico y volumétrico de aire con exceso de aire.

$$G_{ar} = 5.75 * (1 - w) * \lambda = 4.3125 \text{ [kg aire/kg bagazo]}$$

$$V_{ar} = 4.47 * (1 - w) * \lambda = 3.3525 \text{ [m}^3 \text{ aire/kg bagazo]}$$

Donde:

λ = Exceso de aire 1.5

w = Humedad en el bagazo 0.5 %

G_{ar} = Relación aire real húmedo - combustible kg aire/kg bagazo húmedo

V_{ar} = Volumen de aire real húmedo – combustible kg air /kg bagazo húmedo

4.3.1.2 Flujo másico y volumétrico de gases con exceso de aire.

$$G_{gh} = 5.75 * (1 - w) * \lambda + 1 = 5.3125 \text{ [kg gases/kg bagazo]}$$

$$V_{gh} = 4.47 * (1 - w) * \lambda + 0.57 * w + 0.672 = 4.3095 \text{ [m}^3 \text{ gases/kg bagazo]}$$

Donde:

λ = Exceso de aire 1.5

w = Humedad en el bagazo 0.5 %

G_{ar} = Relación gases húmedos - combustible kg gases/kg bagazo húmedo

V_{ar} = Volumen de gases húmedos – combustible kg gases /kg bagazo húmedo

También, se instalará un ducto, o tubería que pasa por el interior del deflector, y se colocará toberas tangencialmente, donde el aire secundario ingresará, provocando la rotación de la masa gaseosa en combustión.

4.3.2 Mejora con inyección de aire secundario

Contribuye favorablemente al quemado de bagazo en suspensión en porcentajes óptimos, ya que permite un mezclado más íntimo del bagazo con el aire, y mayor retención del quemado de las partículas.

Gracias al exceso de aire la temperatura de combustión aumentará, y en consecuencia el rendimiento de la Caldera será mayor.

4.3.2.1 Pérdida del calor sensible en los gases con exceso de aire

$$q = t(1 - w) \left(1.4 * \gamma + \frac{0.50}{1 - w} - 0.12 \right) = [kcal / kg]$$

Donde:

q = Pérdida de calor sensible en los gases

t = Temperatura de los gases en la chimenea 190° C

w = Humedad del bagazo 50 %

γ = Exceso de aire = 1.5

$$q = 283.1 [kcal/kg] \approx 1184.49 [kJ/kg]$$

4.3.2.2 Energía transmitida al vapor por kg de bagazo con exceso de aire

$$Q = \left(4250 - 4850 w - \frac{q}{4.184} \right) * \alpha * \beta * \eta = [kJ/kg]$$

Donde:

Q = Calor transmitido al vapor kcal/kg

w = Humedad del bagazo 0.50 %

q = Pérdida de calor sensible en los gases 283.1 kcal/kg

α = Pérdidas en los sólidos no quemados 0.98

β = Pérdidas debidas a la radiación 0.90

η = Pérdidas combustión incompleta 0.88

$$Q = 1363.97 \text{ [kcal/kg]} \approx 5706.85 \text{ [kJ/kg]}$$

4.3.2.3 Consumo de combustible con exceso de aire

$$m_{cb} = \frac{m_v * (h_{vs} - h_a)}{Q} \text{ [kg/seg]}$$

Donde:

m_{cb} = Cantidad de bagazo tn/h

m_v = Flujo másico de vapor 17 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado 3000.51 kJ/kg

h_a = Entalpia de agua de alimentación 377.039 kJ/kg

Q = Calor transmitido al vapor = 5706.85 kJ/kg

El flujo de combustible con exceso de aire, para la caldera será:

$$m_{cb} = 7.81 \text{ [tn/h]}$$

4.3.3 Rendimiento de la Caldera con exceso de aire

$$\eta = \frac{m_v * (h_v - h_w)}{m_c * PCI} * 100$$

Donde:

PCI = Poder calorífico inferior 17146.66 kJ/ kg

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera 7.81 tn/h

m_v = Flujo másico de vapor 17 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado 3000.51 kJ/kg

h_w = Entalpia de agua de alimentación 377.039 kJ/kg

Entonces $\eta = 0.333 \approx 33 \%$

4.3.4 Propuesta de cambio de tubos, en el banco convectivo

Según la gráfica figura No 11, vemos que hay tubos obstruidos y si se cambian tendríamos un área de calefacción mayor en el banco de tubos, en consecuencia, se generaría más vapor. Al cambiar todos los tubos se tendrá un área de calefacción de 10333 ft²

$$m_v = \frac{q_w * t_e * f * 2.75}{10 * (h_v - h_w)} = [lb \text{ vapor} / h]$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor

q_w = Calor latente del agua a la presión atmosférica 970.4

t_e = Temperatura de ebullición 34.5

f = Superficie de calefacción del banco de tubos 10333 ft²

h_v = Entalpia del vapor sobrecalentado 2843.93 BTU /lb 2885.297

h_w = Entalpía de agua de alimentación 357.327 BTU / lb

Entonces la capacidad de generación de la Caldera No 01 será:

$$m_v = 38258.025 [lb \text{ vapor} / h] \approx 19.13 [tn \text{ vapor} / h]$$

4.3.5 Rendimiento de la Caldera No 01, cambiando el haz convectivo

$$\frac{m_v * (h_v - h_w)}{m_c * PCI} * 100$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor, con el banco de tubos en óptimas condiciones 19.13 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado 3000.51 kJ/kg

h_a = Entalpia de agua de alimentación 377.039 kJ/kg

PCI = Poder calorífico inferior 17146.66 kJ/ kg

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera 9.34 tn/h

Entonces el rendimiento actual por el método directo de la Caldera es:

$$\eta = 0.313 \approx 31 \%$$

4.3.6 Rendimiento de la Caldera No 01, cambiando el haz convectivo e implementando exceso de aire.

$$\frac{m_v * (h_v - h_w)}{m_c * PCI} * 100$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor, con el banco de tubos en óptimas condiciones 19.13 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado 3000.51 kJ/kg

h_a = Entalpia de agua de alimentación 377.039 kJ/kg

PCI = Poder calorífico inferior 17146.66 kJ/ kg

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera con exceso de aire 7.81 tn/h

Entonces el rendimiento actual por el método directo de la Caldera es:

$$\eta = 37.4 \approx 37 \%$$

4.3.6 Comparativo, caldera actual y mejoras.

Tabla 8. *Tabla comparativa eficiencia actual vs eficiencia con mejoras propuestas.*

DATOS OPERACIONALES - CALDERA No 01			
PARAMETROS	ACTUAL	MEJORADO	UNIDAD
Presión de Trabajo	30	30	bar
Agua de Alimentación	90	90	°C
Consumo de Agua	17.5	19.63	tn / h
Consumo de Bagazo	9.34	7.81	tn / h
PCI	13569.33	13569.33	kJ / kg
Exceso de Aire	0	50	%
Flujo masico de Gases	36.51	41.49	tn / h
Flujo volumétrico de Gases	30.72	33.66	m ³ / h
Flujo masico de Aire Primario	28.54	33.68	tn / h
Flujo volumétrico de Aire Primario	21.38	26.18	m ³ / h
Generación de Vapor	17	19.13	tn / h
Motor Tiro Inducido	150	150	HP
Motor Tiro Forzado	50	50	HP
Motor Esparcidor de Bagazo	5	-	HP
Motor Aire Secundario	-	40	HP
Rendimiento	27	37	%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9, muestra los parametros de operación actuales y los que parámetros que se obtendrán mediante la implementación de la propuestas de mejora, en cuanto al flujo másico y volumétrico del aire implementada la mejora, se considera el exceso de aire que es del 50%.

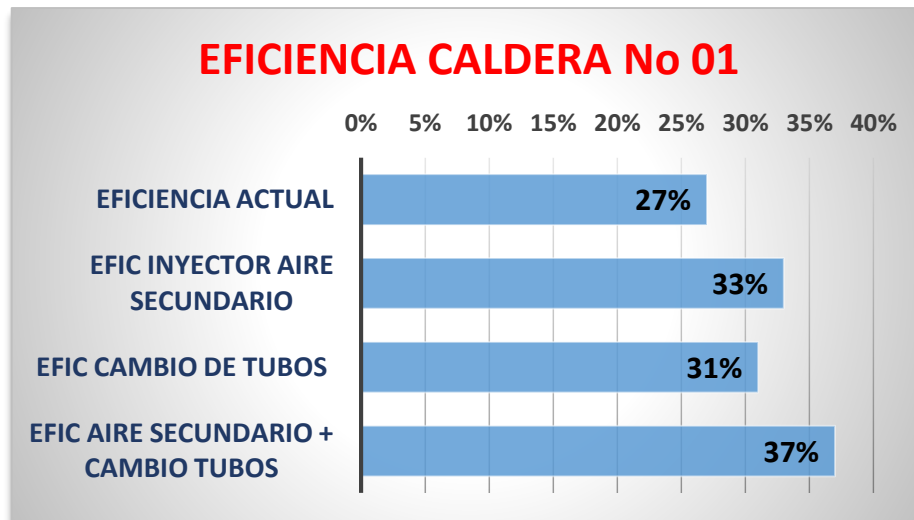


Gráfico 7. Eficiencia actual, eficiencia con mejoras en la Caldera No 01.

Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico presenta las diferentes propuestas de mejora y su influencia en la mejora de la eficiencia de la caldera. Se optó por implementar ventilador aire secundario y cambiar parte de la tubería de agua del banco convectivo aumentando la eficiencia a 37%.

Calculo para determinar el motor para ventilador aire secundario

$$P = \frac{Q * H * g}{1000 * \eta_v * \eta_m} = [kW]$$

Donde:

Q = Caudal de aire 9.35 m³/s

H = Presión estática a desarrollar por el ventilador 180 mmca

g = Aceleración de la gravedad 9.81 m/s²

η_v = Eficiencia del ventilador 0.70 %

η_m = Eficiencia del motor eléctrico 0.90%

$$P = 25.8 \text{ kW} \approx 36.6 \text{ HP}$$

Por lo tanto se opta por un motor de 40 HP para accionar al ventilador aire secundario.

4.4 Realizar una evaluación económica de las propuestas dadas

Se consultó al encargado y especialistas del equipo de mantenimiento de calderas, la propuesta más viable y pronta es la implementación de aire secundario, ya que el cambio de tubos, implica cambiar todo el banco convectivo, esto se realiza en una parada anual programada.

4.4.1 Costos de la propuesta de implementación de aire secundario

4.4.1.1 Costos de construcción y montaje del inyector aire secundario

En la siguiente tabla se detallan los costos que demandan la construcción del inyector de aire secundario, donde incluyen los materiales y equipos para su confección, mano de obra de confección y montaje del equipo.

Tabla 9. Costos de materiales para la construcción del inyector secundario.

INVERSIÓN DEL PROYECTO - MATERIALES - EQUIPOS				
MATERIALES	CANT	UNIDAD	PRECIO UNIT	TOTAL
Plancha de fierro ASTM A36, para la construcción de ventilador	4	Pieza	375.08	1,500.32
Plancha de fierro ASTM A34, para construcción de ducto de aire	6	Pieza	333.08	1,998.48
Inyectores de acero fundido	9	Pieza	150.00	1,350.00
Eje para ventilador de 2 1/2"	1	Pieza	4,000.00	4,000.00
Chumaceras completas para eje de 2 1/2"	2	Pieza	914.05	1,828.10
Motor eléctrico 40 Hp	1	Pieza	13,475.00	13,475.00
Soldadura cellorcord 6011 - 1/8"	44	kg	12.55	552.20
Soldadura supercuto 7018 - 1/8"	44	kg	12.25	539.00
Disco de corte 12" x 1" x 5 mm	30	Pieza	12.00	360.00
Disco de desbaste 7" x 1" x 5 mm	20	Pieza	7.00	140.00
Acetileno	16	m ³	10.00	160.00
Oxigeno	24	m ³	10.00	240.00
Pernos G8 5/8"x4"	32	Pieza	8.00	256.00
SUB TOTAL				S/26,143.10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Costos de alquiler de equipos para la construcción.

INVERSIÓN DEL PROYECTO - EQUIPOS				
EQUIPOS	CANT	DÍAS	PRECIO/ DIA	TOTAL
Máquina de soldar	2	20	100.00	4,000.00
Equipo oxicorte	1	4	70.00	280.00
Amoladora	2	20	30.00	1,200.00
Dobladora de tubos	1	6	200.00	1,200.00
Cortadora	1	2	60.00	120.00
SUB TOTAL				S/6,800.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Costos de mano de obra, construcción del inyector de aire.

INVERSIÓN DEL PROYECTO - MANO DE OBRA CONFECCIÓN				
PERSONAL	CANT	DÍAS	PRECIO / DIA	TOTAL
Supervisor	1	14	150.00	2,100.00
Soldador	2	14	120.00	3,360.00
Armador	1	14	80.00	1,120.00
Biselador	1	14	60.00	840.00
Oficial	1	14	50.00	700.00
SUB TOTAL				S/8,120.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Costos de mano de obra, montaje del inyector de aire.

INVERSIÓN DEL PROYECTO - MANO DE OBRA MONTAJE				
PERSONAL	CANT	DÍAS	PRECIO / DIA	TOTAL
Supervisor	1	4	150.00	600.00
Soldador	2	4	120.00	960.00
Armador	1	4	80.00	320.00
Mecánico	1	4	60.00	240.00
Oficial	1	4	50.00	200.00
Tecele 1 tn	2	4	40.00	320.00
Máquina de soldar	2	4	100.00	800.00
TOTAL				S/3,440.00

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2 Costos total o inversión de la mejora inyector de aire secundario.

En la siguiente tabla se muestra el costo total del proyecto, inyector de aire secundario. Este costo será la inversión, que se tomado para el análisis económico de la propuesta de mejora.

Tabla 13. Costo total de la implementación de mejora.

COSTO DE LA INVERSIÓN PROYECTO INYECTOR AIRE SECUNDARIO	
Costo de materiales para construcción del inyector aire secundario	S/26,143.10
Costo de alquiler de equipos para la construcción del inyector	S/6,800.00
Costo de la mano de obra para la construcción del inyector	S/8,120.00
Costo de la mano de obra para el montaje del inyector de aire	S/3,440.00
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	S/44,503.10

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.3 Costos total o inversión de la mejora inyector de aire secundario.

En la siguiente tabla se muestra los costos de mantenimiento que se realizaran en el equipo inyector de aire secundario. Estos costos serán tomados como egresos, para el análisis económico de la propuesta de mejora.

Tabla 14. Costo de mantenimiento, inyector aire secundario.

COSTO MANTENIMIENTO MENSUAL				
MANTENIMIENTO	PERIODO	CANT	PRECIO UNIT	TOTAL
Cambio de rodamientos eje ventilador	Anual	2	495.75	991.50
Cambio de rodamientos del motor de 40 Hp	Anual	2	125.35	250.70
Mantenimiento de motor	Anual	1	580.00	580.00
Grasa especial - Lubricación chumaceras	Mensual	1	120.00	1,440.00
Tecele 1 tn	Anual	1	80.00	80.00
Mecánicos	Mensual	1	80.00	960.00
COSTO MANTENIMIENTO ANUAL				S/4,302.20

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Análisis económico de la propuesta dada.

Dada la propuesta, y según el cálculo, gracias al inyector de aire se conseguirá, un ahorro de 1.53 tn/h de bagazo, contando con 21 horas efectivas de molienda se conseguirá un ahorro al día de 32.13 tn/d. Contando con 24 días de molienda mensuales por 11 meses efectivos de molienda al año, se conseguirá ahorrar 8482.32 tn al año, sabiendo que el bagazo está a S/20.00 la tonelada, constituye un ingreso económico anual de S/169 646.40

Esta propuesta es viable, ya que el retorno de la inversión, incluyendo los costos de mantenimiento del equipo, se retornara en un lapso de medio año aproximadamente, por lo que se considera a corto plazo.

Tabla 15. *Tabla análisis económico VAN, TIR, de la mejora propuesta.*

INDICADORES	AÑO 0	AÑO 1
EGRESOS	S/44,503.10	S/4,302.20
INGRESOS	0	S/169,646.40
FLUJO EFECTIVO	-S/44,503.10	S/165,344.20
TASA DESCUENTO		15%
VALOR ACTUAL NETO - VAN		S/99,274.47
TASA INTERNA DE RETORNO - TIR		272%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. *Valor actual neto de la propuesta dada.*

TASA DESCUENTO	VAN
30%	S/82,684.75
60%	S/58,837.03
90%	S/42,520.16
120%	S/30,653.35
150%	S/21,634.58
180%	S/14,548.40
210%	S/8,833.74
240%	S/4,127.55
270%	S/184.52

300%	-S/3,167.05
330%	-S/6,050.96
360%	-S/8,558.71

Fuente: Elaboración propia



Gráfico 8. Valor actual neto de la propuesta de mejora.

Fuente: Elaboración propia

V. DISCUSIÓN

Gracias a las guías de observación realizadas, se logró recoger los datos para el desarrollo de la investigación de una manera ordenada y puntual.

Sierra (2005, p.64). En su investigación, menciona: es de vital importancia saber y conocer con profundidad el funcionamiento de estos equipos (Calderas Acuotubulares); para ello se consultaron bibliografías relativas a: generadores de vapor, procesos de generación de vapor, procesos de combustión, tecnologías en control de llama para generadores de vapor, entre otros; y así de esta forma caracterizar cada una de las calderas (tipo, capacidad, potencia, etc.).

Efectivamente para levantar la información del objeto de estudio, que es la Caldera No 01; se recurrió al departamento de mantenimiento del área de Calderas, donde se consultó la ficha técnica según el fabricante, o también conocida como la "partida", para verificar sus datos de diseño como capacidad de generación, presión de trabajo y sus equipos que conforman la caldera.

La caldera tiene un diseño muy particular, de 3 tambores superiores de vapor y un tambor central de lodo, conectados por 585 tubos de $\frac{3}{4}$ shedule 40, estos son tubos curvos. Actualmente en los ingenios de Latinoamérica, ya no funcionan este tipo de calderas, por ser de modelo antiguo.

La caldera en estudio, tiene como combustible el bagazo, que es el residuo, generado en la extracción de la caña en el trapiche. Una de las propiedades físicas del bagazo es la humedad y depende del estado en que se encuentran los equipos de extracción, entonces la humedad del bagazo como combustible influirá directamente en su poder calorífico.

La energía liberada del bagazo como combustible, está determinada por su poder calorífico, este influye directamente en la eficiencia de la caldera. Este valor calorífico es la cantidad de calor que puede producirse por la combustión de la unidad de peso del bagazo.

Siquina (2009, p.62), menciona que el PCI, del bagazo tiene un contenido de humedad que oscila entre el 40% y 60%. Cabe mencionar que la fibra del bagazo también influye en la combustión.

El contenido de humedad en el bagazo, es una variable que depende del estado de los equipos de extracción, en el Ingenio de Pomalca, este valor oscila entre el 48% a 52%. Entonces el PCI dependerá del valor de la humedad, mientras más bajo y constante sea este valor, la combustión será, eficiente en consecuencia una estable generación y suministro de vapor.

Otros valores que también influyen en el PCI del bagazo, son el contenido de sacarosa, que depende directamente de la extracción en los molinos, oscilando entre el 2.7 y 3.5 %. El contenido de fibra también influye, que depende de la calidad de caña, tiempo de madurez y frescura este valor oscila entre el 39 y 53 %.

La caldera No 01, cuenta con hornos tipo herradura, durante el proceso de combustión, el bagazo se acumula en forma de pila, donde las partículas quemadas generan el 50% del calor de la combustión.

Morales (2012, p.62), menciona que en la práctica, las condiciones de la combustión nunca es completa, por lo que es necesario adicionar cierta cantidad de aire.

Se pudo obtener el registro del consumo de bagazo del mes de octubre, donde se pudo analizar la data, desde el primer día de arranque de molienda después de la reparación programada a la Caldera No 01, se consume 9.3 tn / h de bagazo, con el pasar de los días de trabajo el consumo aumenta hasta 9.6 tn / h.

El consumo de bagazo aumenta debido a las incrustaciones de particulado, ceniza y hollín en las toberas del aire primario, sumado a ello las incrustaciones de sólidos, aumentando la pared de la tubería de agua, producto de la mala calidad de agua de alimentación que ingresa a la caldera.

Odar (2016, p.62). El consumo de bagazo es un punto fundamental ya que permite determinar el grado de eficiencia de la Caldera. Es un parámetro importante relacionado directamente con la Caldera, con el consumo actual de la Caldera No

01, se tiene una eficiencia de 27%. En nuestro caso de estudio se incrementa el flujo de combustible después de los días de mantenimiento, por diferentes factores, como el estado de la extracción, también el estado del hogar de combustión.

Para el cálculo del rendimiento actual de la caldera No 01, se calculó las calorías transferidas al vapor, determinada por la diferencia de las entalpías del vapor sobrecalentado (a una temperatura de 300 °C y una presión de 28 kg/cm²) y el agua de alimentación de la Caldera (a una temperatura de 90 °C y una presión de 30 kg/cm²).

También se calculó la energía aportada por el bagazo como combustible (PCI); la diferencia de estos valores mencionados, da como resultado el porcentaje de eficiencia de la Caldera.

Según Hugot (1972, p.597), la eficiencia de las calderas de tubos de agua con hornos de herradura, es del 60 %.

Para aumentar la eficiencia de la caldera, se presentó la mejora de implementar un inyector de aire secundario, lo cual no solo ayuda a tener una mejor combustión, sino también se consiguió un ahorro del 16 %, consumiendo 7,81 tn / h; lo que genera ingreso económico por concepto del combustible.

El calentamiento del aire secundario permite a la Caldera tener una mejor combustión obteniéndose un equilibrio térmico ideal en el hogar al inyectarse aire con cierta energía esta energía es aprovechada para mantener temperatura alta con la finalidad de asegurar las reacciones de los productos de la combustión y así evitar la formación del hollín.

El sistema de aire secundario tiene que estar convenientemente distribuidos para crear una tortura encia Qué es necesario para mezclar íntimamente el aire con El bagazo aumentando así el tiempo de el quemado de las partículas o del bagazo en suspensión contribuyendo así a una combustión completa del bagazo disminuyendo en gran parte los income a 2 por lo tanto se obtienen menores cantidades de emisiones de gases de combustión reduciendo y mitigando el impacto ambiental.

Según Golato y Paz (2015, p.3), en su artículo científico; menciona que el aire insultado en el interior del horno, contribuye al aumento de la turbulencia dentro de la cámara de combustión.

Logrando cambiar los tubos en mal estado, por incrustaciones y recalentamiento, e instalando el equipo aire secundario, se logró aumentar la eficiencia de la caldera a 31 %.

Al implementar a la Caldera No 01 las mejoras cómo son el sistema de aire secundario y el cambio de tubos en el haz convectivo se logró obtener un aumento en la eficiencia de la Caldera de 37% y la disminución del consumo de bagazo a 7.8 tn/h.

Gracias a la implementación de esta propuesta se logrará un ahorro de 1.53 tn/h de bagazo, consiguiendo un ahorro Al Día de 32.13 tn/d, lo que significa un ingreso económico anual de S/169 646.40, ya que la tonelada de bagazo actualmente oxila en 20 soles.

Esta propuesta es viable, ya que el retorno de la inversión, incluyendo los costos de mantenimiento del equipo, se retornara en un lapso de medio año aproximadamente, por lo que se considera a corto plazo.

VI. CONCLUSIONES

- Se realizó un diagnóstico a la Caldera No 01, para saber las condiciones actuales en que se encuentran operando todos sus equipos, donde se encontró deficiencias, por la antigüedad de sus equipos y por la falta de mantenimiento preventivo y correctivo.

La capacidad de generación de vapor actual que en el mejor de los casos está en 17 tn/h, según el encargado del área, se encontró deficiencia en el banco de convección, especialmente en la parte frontal donde los tubos están con paredes incrustadas por sólidos por mala calidad de agua suministrada a la Caldera.

Otro punto muy importante es el tiempo perdido de la Caldera durante el año, donde el encargado del área menciona que por fallas mecánicas y falta de mantenimiento es el 80% (134.4 horas) y un 20% (33.6 horas) operacional. En el 2019 hubo varias horas perdidas por tubos rotos; en comparación con las demás calderas, esta tuvo el mayor tiempo perdido en el año.

- Se realizaron cálculos para determinar la eficiencia actual de la Caldera No 01, se comenzó analizando el combustible, se calculó los productos gaseosos de la combustión de un kg de bagazo húmedo, donde se determinó la cantidad de aire 3.056 kg / kg de bagazo y la cantidad de gases generados 3.909 kg de gases húmedos / kg de bagazo.

El bagazo con un contenido de humedad del 50%, tiene un poder calorífico inferior de 17146.66 kJ/kg de bagazo húmedo, siendo el consumo de bagazo de la caldera 9.34 tn/h. Con estos parámetros se determinó la eficiencia de la Caldera por el método indirecto, se obtuvo un valor 27%, teniendo como referencia la relación, del calor total aprovechado (cantidad de vapor generado), sobre el consumo del combustible y su poder calorífico superior (PCS).

- Se propusieron mejoras con el propósito de aumentar la eficiencia de la Caldera No 01. La primera propuesta fue implementar un sistema de inyección secundaria con un exceso de aire del 50%, para ayudar a tener una mejor combustión y ayudar a quemar por completo el bagazo, gracias a la turbulencia

que causa el aire. Para este propósito se necesita de realizar unas modificaciones en el bafle del hogar colocando tobera tangencialmente por donde circulara el aire.

La segunda propuesta, es cambiar los tubos deteriorados de la parte frontal del haz convectivo, esto es necesario tomando en cuenta el alto tiempo perdido por esta causa.

- Se realizó una evaluación técnica de las propuestas presentadas, consultando con expertos en cogeneración, donde implementando la inyección aire secundario, la caldera tendría una eficiencia del 31%. Consiguiendo ahorrar 32.13 toneladas de bagazo al día.

Cabe resaltar que se tendrá que realizar modificación en sus equipos, el motor de 5 HP del ventilador del esparcidor de bagazo, será cambiado por el del aire secundario de 40HP. También se realizó una evaluación económica de las mejoras elegidas, donde se registrará un ingreso económico anual de S/169 646.40, por concepto de ahorro de bagazo como combustible.

- Gracias al estudio energético que se realizó a la caldera No 01, se logró determinar la eficiencia actual de la caldera, en función a los parámetros de operación y funcionamiento. Conociendo el estado con el que opera la caldera, con un rendimiento del 27%, se consultó a especialistas y se optó por implementar acciones para mejora de la eficiencia, eligiendo instalar un equipo de aire sobre fuego, se realizaron los cálculos logrando aumentar la eficiencia a un 33 %. También se consiguió ahorrar 32 tn/d de bagazo como combustible.

VII. RECOMENDACIONES

- Como se mencionó en el diagnóstico realizado a la Caldera, existe un considerable tiempo perdido por problemas operacionales. Dada la situación se recomienda a los jefes encargados crear guías de operación de la Caldera, para que el operador pueda inspeccionar los diferentes equipos, y monitorear funcionamiento, sabiendo responder a cualquier eventualidad que se presente en plena operación, como, por ejemplo: bajo nivel de agua, bajo suministro de bagazo, baja presión de vapor, problemas mecánicos, desenganches en planta de fuerza, entre otros. Todo esto con el único fin de reducir paradas innecesarias.

También es necesario realizar capacitación al personal técnico de operación y mantenimiento de calderas, por parte de terceros; al menos dos veces por año.

- Al no contar con una planta de tratamiento de agua, es necesario realizar el mantenimiento o limpieza con presión de agua, al banco de tubos en cada reparación programada, verificando el grado de corrosión e incrustación de sólidos, con el fin de evaluar la dureza del agua de alimentación.
- Instalar sensores o instrumentos de medición, por ejemplo:

Medir el flujo de aire que se introduce al horno de la caldera, (el exceso de aire está en el rango de 30% a 60%, dependiendo del porcentaje de humedad del bagazo); así podrá controlar mediante dámara, el ingreso del aire necesario para una mejor combustión del bagazo.

Medir la cantidad de gases de combustión de salida, para poder obtener el contenido de CO₂, que produce la combustión.

Medir la cantidad de vapor a la salida de la Caldera, y a la entrada de los turbogeneradores, como también la temperatura del vapor.

- Implementar una gestión de mantenimiento en el área de Calderas, respetando las horas de trabajo de los equipos (motores, bombas, ventiladores, tuberías, colectores, válvulas, reductores), como también los elementos rotativos

(rodamientos, chumaceras, acoples), para su cambio o mantenimiento. Así reducir los tiempos perdidos por fallas mecánicas.

- Colocar aislamiento a las tuberías de agua de alimentación a la caldera, como también a las de vapor. Mejorar la estructura refractaria de los hogares, y paredes.
- Siendo el área de Calderas de alto riesgo en probabilidades de accidentes, por las altas de temperaturas del vapor, temperaturas altas al limpiar los hogares, la polución que genera la combustión incompleta; se recomienda la implementación de los equipos de protección a todo el personal de operación y de mantenimiento.

REFERENCIAS

- Hugot E. (1972). *Manual para Ingenieros Azucareros*. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V.
- Alderetes C. (2016). *Calderas a Bagazo – Proyecto, Operación y Mantenimiento*. Impreso en Argentina.
- Payner. H. (1991). *Cogeneration in the cane sugar industry*. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V.
ISBN: 0444888268
- Rein P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Impreso en Alemania.
- Gaffert A (1981). *Centrales de vapor*. Barcelona: Editorial REVERTÉ S.A.
- Borroto, A. y Rubio. A. (2010). *Combustión y generación de vapor*. La Habana: Editorial Félix Varela.
- Mesny, M. (1976). *Generación de vapor*. La Plata: Ediciones Marymar.
- Dominguez, J. (2012). *Guía básica de calderas industriales eficientes*. Madrid: Graficas Arias Montano, S.A.
- Lawrence, A. (2000). *Manual de calderas*. (2da edición). España: EDIGRAFOS, S.A.
- Babcock & Wilcox (1992). *STEAM its generation and use*. USA: Edited by S.C. Stultz J.B Kitto.
- Siquiná, G. (2008). *Análisis termodinámico para el mejoramiento de la eficiencia de operación de la caldera del ingenio Tumulá (Tesis de grado)*. Recuperada de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0621_M.pdf
- Morales, A. (2012). *Evaluación del de vapor # 2 de la U.E.B. Central Azucarero Majibacoa*. (Trabajo de diploma). Recuperada de <http://roa.ult.edu.cu/handle/123456789/3135>

- Sierra, G y Amelia, E. (2005). Estudio de la eficiencia de combustión de la sala de calderas de la empresa REMAVENCA establecimiento Turmero edo. Aragua. (Trabajo de grado). Recuperada de <http://saber.ucv.ve/handle/123456789/15504>
- Odar, G. (2016). Propuesta de auditoria energética del caldero n°5 para incrementar la eficiencia de la empresa Industrial Pucala s.a.c- 2016. (Tesis de grado). Recuperada de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/8915>
- Soza, Jason. (2013). Evaluación tecnológica de las Calderas No 6 y No 7 y sus equipos periféricos del Ingenio Monte Rosa en el periodo de zafra 2011-2012. (Tesis de grado). Recuperado de <http://repositorio.cnu.edu.ni/Record/RepoUNI821>
- Golato, M y Aso, G. (diciembre, 2005). Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico. Revista Industrial Y Agrícola de Tucuman (tomo 82). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/262700838_Inyeccion_de_aire_secundario_caliente_en_calderas_de_vapor_bagaceras_y_su_influencia_en_el_rendimiento_termico
- Rodas, E y Machuca, P. (2016). Análisis comparativo de la eficiencia térmica en la caldera bagacera n°4 en funcionamiento convencional y con inyector secundario de aire caliente en la empresa Agroindustrial Pomalca s.a.a. (Tesis de grado). Recuperado de <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/4413/Rodas%20Flores%20-%20Vargas%20Machuca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, H. (2011). Potencial de Cogeneración a partir de los Residuos Biomásicos de la Caña de Azúcar en el Perú. (En XVII Simposio de Energía Solar.) (pp. 15 - 25). LIMA. APES. Recuperado de: http://perusolar.org/17-spes-ponencias/08-Biomasa/GarciaBustamanteHenry/Garcia_Bustamante_Henry.pdf

- ARTEAGA, A. (junio, 2011) Cogeneracion, una alternativa importante de ahorro energetico nacional. Revista La Tecnica (70 – 75). Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6087705>
- Felix, E.; Felix, E.; Salvatore, M.; Ramos, C.; GARCIA, H. E.; Crispin, M.(2010). Metodología Aplicada en el Análisis de Recursos de Biomasa Leñosa y de Residuos para Uso Combustible. En El Análisis de BEFS para Perú; Compendio Técnico; Volumen II; Metodologías. (pp. 53 - 90). ROMA. FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/013/i1708s/i1708s00.htm>
- Miguez, C. (2013). La eficiencia energetica en el uso de la biomasa para la generacion de energia electrica: optimizacion. (Tesis de doctorado). Recuperado de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/17794/1/T34108.pdf>
- Barboza, A. (2015). Auditoria Energética de la Empresa Agroindustrial Tután. (Tesis de grado, Universidad Pedro Ruiz Gallo). (Acceso el 12 de enero del 2020).
- Federico J. y Colombres, F. (2011). Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina. Revista industrial y agrícola de Tucumán (vol.88, 41-49). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/260778248_Rendimiento_termico_de_calderas_bagaceras_modernas_en_Tucuman_R_Argentina
- Garcia, R. (2001). Combustión y combustibles. Buenos Aires: Edited by Daniel Van Velzen.
- Blanco, N y Díaz, E. (2014). Evaluación económica y social del uso del bagazo de caña en la generación de energía eléctrica en Nicaragua. Revista Tecnología en Marcha. (Vol. 27, N° 3, Julio-Setiembre 2014. Pág 107-121). Recuperado de <file:///C:/Users/Toshiba/Downloads/Dialnet-EvaluacionEconomicaYSocialDelUsoDelBagazoDeCanaEnL-4896368.pdf>
- Lahoz, J. (2012). Guía Basica de Calderas Industriales Eficientes. Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A.

- Parra, J. (2017). Estudio del sistema de cogeneración a partir de biomasa en los ingenios azucareros. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/4743>
- Rico, J. (2016). Cada vez más bagazo de caña de azúcar en el etanol europeo. Renewable Energy Magazine, 2. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/-1/cada-vez-mas-bagazo-de-cana-de-20160707>
- Rodríguez, A., Carrasco, S., López, E., & Jiménez, R. (2018). Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomasa a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal. Cuba: Universidad de Cienfuegos. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v11n1/2218-3620-rus-11-01-295.pdf>
- Rubio, A. (2019). Estudio de la pérdida de calor por combustión incompleta volátil en calderas Retal. Santa Clara, Cuba: Universidad Central de las Villas. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Angel-Rubio-Gonzalez/publication/333852880_ESTUDIO_DE_LA_PERDIDA_DE_CALOR_POR_INCOMBUSTION_MECANICA_VOLATIL_EN_CALDERAS_RETAL_MEDIANTE_SIMULACION_AERODINAMICA/links/5d08fd82299bf1f539ce69d6/ESTUDIO-DE-LA-PERDIDA-DE-CAL
- Uceda, J. (2012). Guía básica de calderas industriales eficientes. Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A. Obtenido de <https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>

ANEXO 1. Matriz de operacionalización de las variables.

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINION OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <p>Realizar un estudio energético de la caldera acuotubular No 01, de tres domos superiores</p>	<p>El diagnóstico energético es un estudio integral y personalizado de los consumos de un equipo, el que se desarrolla un plan estructurado de ahorro energético que te permitirá ahorrar en tus suministros y consumos de energía.</p>	<p>Medir la concentración de los gases de combustión, su temperatura, el aire de admisión, el consumo de combustible, para determinar la eficiencia.</p>	<p>Estudio energético</p> <p>Generación de vapor</p>	<p>Rendimiento</p> <p>Consumo de combustible</p> <p>Generación de vapor</p>	<p>Razón</p>
<p>VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <p>Mejorar la eficiencia de cogeneración.</p>	<p>La cogeneración se presenta como una medida para garantizar su competitividad, hoy y, sobre todo, en el futuro, ya que aumenta la eficiencia energética hasta en un 30% y reduce los costos de electricidad.</p>	<p>Consumir menos combustible, y generando más o igual vapor.</p>	<p>Rendimiento de la Caldera</p> <p>Beneficio económico</p>	<p>Ahorro de combustible</p> <p>Análisis de costos</p>	<p>Razón</p>

ANEXO 2. Validación de los instrumentos.

INDICACIONES AL EXPERTO

En la tabla siguiente, se propone una escala del 1 al 5, que va en orden ascendente del desconocimiento al conocimiento profundo. Marque con una "X" conforme considere su conocimiento sobre el tema del proyecto de investigación evaluado.

1 Ninguno	2 Poco	3 Regular	4 Alto	5 Muy Alto
--------------	-----------	--------------	----------------------	---------------

Sírvase marcar con una "X" las fuentes que considere han influenciado en su conocimiento sobre el tema, en un grado alto, medio, o bajo.

FUENTES DE ARGUMENTACIÓN	GRADO DE INFLUENCIA DE CADA UNA DE LAS FUENTES EN SUS CRITERIOS		
	A (ALTO)	B (MEDIO)	C (BAJO)
a) Análisis teóricos realizados (AT)	X		
b) Experiencia como profesional (EP)	X		
c) Trabajos estudiados de autores nacionales (AN)	X		
d) Trabajos estudiados de autores extranjeros (AE)		X	
e) Conocimientos personales sobre el estado del problema de investigación (CP)	X		


DAVID ODAR PACHERREZ
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
REG CIP 244881

Firma del entrevistado

Estimado experto:

El instrumento de recolección de datos a validar es una guía de observación, cuyo objetivo es recolectar información relacionada con respecto a la investigación:

"Estudio energético de la Caldera acuotubular No 01, de tres domos superiores, para mejorar la eficiencia de cogeneración en Agroindustrial Pomalea".

De tal manera que, con la finalidad de corroborar la validación del instrumento de recolección de datos, por favor le pedimos responda a las siguientes interrogantes:

1. ¿Considera importante la aplicación de esta guía de observación para los fines establecidos en la investigación?

Es pertinente Poco pertinente o es Impertinente

Por favor, indique las razones:

Este instrumento es pertinente, ya que se podrá registrar los valores, obtenidos producto de la medición y observación del funcionamiento de la caldera.

2. ¿Considera que la guía de observación formula los datos suficientes para los fines establecidos en la investigación?

Son suficientes Insuficientes

Por favor, indique las razones:

Este instrumento, está bien elaborado, ya que podemos registrar de una manera específica y ordenada todos los datos.

3. ¿Considera que la guía de observación está adecuadamente formulada de manera tal que no haya dudas en la toma y recolección de datos?

Son adecuadas Poco adecuadas Inadecuadas

Por favor indique las razones:

Se puede registrar datos y valores necesarios para el desarrollo, cálculos de esta investigación.

4. ¿Califique los ítems según un criterio de precisión y relevancia para el objetivo del instrumento de recolección de datos?

ÍTEM	PRECISIÓN			RELEVANCIA			SUGERENCIAS
	Muy precisa	Poco precisa	No es precisa	Muy relevante	Poco relevante	Irrelevante	
1	X			X			
2	X			X			
3	X			X			

5. ¿Qué sugerencias haría Ud. para mejorar el instrumento de recolección de datos?

Asegurarse que los equipos, o instrumentos de medición estén calibrados, para obtener un valor exacto.

Le agradecemos por su colaboración en este proyecto de investigación.

Fecha de evaluación 10 / 01 / 20



DAVID ODAR PACHERREZ
 INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
 REG CIP 244881

Firma del experto

Anexo 3. Instrumentos de recolección de datos.

ESTADO ACTUAL DE LOS EQUIPOS DE LA CALDERA No 01					
EQUIPO	COMPONENTES	ESTADO			
		MB	B	R	D
MB: Muy bueno B: Bueno R: regular D: Deficiente					

Anexo 4. Ficha tecnica de la caldera No 01, Pomalca

CALDERA 01		
Fabricación	Babcock & Wilcox	
Modelo	Sterling	
Año de fabricación	1948	
Presión	40 Kg/cm ² 382°C	
Combustible	Bagazo	
Capacidad	53,800 lbs/hr	24.5 Ton/hr
Hornos	3 hornos de Ward	
Tambores	3 tambores de vapor	
	1 tambor de lodo 38.5/8" x 23'-9"	
Tubos de agua	624 - 3.1/4" exterior x 8 SWG	
Superficie de calefacción	951 m ²	10,233 ft ²
Calentador de aire	743.5 m ²	8,000 ft ²
	824 tubos 2" 1/2" x 7 SWG	
Sobrecalentador	117 tubos de 2"	1,120 ft ²
	104 m ²	
Ventilador tiro forzado	25,600 pies ³ /min	725 m ³ /min
	Accionado por motor 50 HP - 875 rpm	
Ventilador tiro inducido	Accionado por motor 150 HP - 870 rpm	
Ventilador aire secundario	Accionado por motor 5 HP - 900 rpm	

Anexo 6. Tabla, vapor de agua sobrecalentado.

Vapor de agua sobrecalentado												
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	$P = 0.01 \text{ MPa (45.81}^\circ\text{C)}^*$				$P = 0.05 \text{ MPa (81.32}^\circ\text{C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61}^\circ\text{C)}$			
Sat. ¹	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
	$P = 0.20 \text{ MPa (120.21}^\circ\text{C)}$				$P = 0.30 \text{ MPa (133.52}^\circ\text{C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61}^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
	$P = 0.50 \text{ MPa (151.83}^\circ\text{C)}$				$P = 0.60 \text{ MPa (158.83}^\circ\text{C)}$				$P = 0.80 \text{ MPa (170.41}^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

Fuente: Cengel, 2011

Tabla, propiedades de los gases de combustión.

Propiedades físicas de los gases de combustión							
(B=1.01 x 10 ⁵ Pa; ρ _{CO2} = 0.13; ρ _{H2O} =0.11; ρ _{N2} =0.76)							
t	ρ	Cp	λ x 10 ²	a x 10 ⁶	μ x 10 ⁶	v x 10 ⁶	Pr
°C	kg/m ³	kJ/kg °C	W/(m °C)	m ² /s	Pa.s	m ² /s	
0	1.295	1.042	2.28	16.9	15.8	12.2	0.72
100	0.95	1.068	3.13	30.8	20.4	21.54	0.69
200	0.748	1.097	4.01	48.9	24.5	32.8	0.67
300	0.617	1.122	4.84	69.9	28.2	45.81	0.65
400	0.525	1.151	5.7	94.3	31.7	60.38	0.64
500	0.457	1.185	6.56	121.1	34.8	76.3	0.63
600	0.405	1.214	7.42	150.9	37.9	93.61	0.62
700	0.363	1.239	8.27	183.8	40.7	112.1	0.61
800	0.33	1.264	9.15	219.7	43.4	131.8	0.6
900	0.301	1.29	10	258	45.9	152.5	0.59
1000	0.275	1.306	10.9	303.4	48.4	174.3	0.58
1100	0.257	1.323	11.75	345.5	50.7	197.1	0.57
1200	0.24	1.34	12.62	392.4	53	221	0.56

Fuente: Cengel, 2011

Tabla, agua saturada a diferentes temperaturas

Agua saturada. Tabla de temperaturas												
Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Líqu. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Líqu. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Líqu. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
		0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292

Fuente: Cengel, 2011

Anexo 7. Galería fotográfica

Tubería del sobrecalentador de caldera No 01



Tubería frontal de la caldera No 01



Monitor de control Caldera No 01



Caldera No 01 – Vista lateral



Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, **JAMES SKINNER CELADA PADILLA**, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la **UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - CHICLAYO**, asesor de Tesis titulada:


“ESTUDIO ENERGÉTICO DE LA CALDERA ACUOTUBULAR NO 01, DE TRES DOMOS SUPERIORES; PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE COGENERACIÓN EN AGROINDUSTRIAL POMALCA”

Del autor es **LIZA PISFIL JOSÉ ALBERTO**, constato que la investigación cumple con el índice de similitud de 24% verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Chiclayo, 15 de agosto del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor: CELADA PADILLA JAMES SKINNER	
DNI 16782335	Firma 
ORCID 0000-0002-5901-2669	