



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA

**Análisis, para reducir las pérdidas de calor en la caldera
acuotubular No 06, en agroindustrial Pomalca**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTOR:

Torres Villalobos, Javier Eduardo ([ORCID:0000-0001-5374-3869](https://orcid.org/0000-0001-5374-3869))

ASESOR:

Mg. Celada Padilla, James Skinner ([ORCID:0000-0003-1389-4093](https://orcid.org/0000-0003-1389-4093))

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 darme las fuerzas para alcanzar mis metas, y guardarme en todo momento, también dedico este trabajo a mis padres por forjarme por el camino del bien, muchos de mis logros son gracias a su incondicional apoyo, incluyendo este que significa mucho para mí.

Agradecimiento

A mi querida familia, a mi esposa Cecilia, mis hijos Cristian, Fabricio y Pierina, por haberme apoyado en todo momento, por el ánimo constante, a mis padres por instruirme por el camino del bien y de la verdad, y en especial a mi querido padre que me ilumina desde el cielo.

A mis amigos y compañeros de trabajo por aportar y hacer que pueda concretar esta investigación.

A esta casa de estudios, por acogerme y brindarme calidad educativa, a mis profesores que me instruyeron a lo largo de mi formación y en especial a mi asesor por apoyarme en esta investigación.

Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Índice de gráficos	vii
Resumen.....	viii
Abstract	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Tipo y diseño de Investigación.....	17
3.2. Variables, operacionalización.....	17
3.3. Población, muestra y muestreo.....	18
3.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	18
3.5. Procedimientos.	20
3.6. Método de análisis de datos.....	21
3.7. Aspectos éticos.....	21
IV. RESULTADOS	22
V. DISCUSIÓN.....	50
VI. CONCLUSIONES.....	54
VII. RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS.....	58
ANEXOS	63

Índice de tablas

Tabla 1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
Tabla 2. Parámetros de molienda en Ingenio Pomalca.....	23
Tabla 3. Datos de operación de la Caldera No 06.....	24
Tabla 4. Equipos de la caldera acuatubular No 06.....	26
Tabla 5. Relación de motores Caldera No 06.....	27
Tabla 6. Medición de temperatura de gases de salida, Caldera No 06.	28
Tabla 7. Análisis de bagazo.	29
Tabla 8. Tiempo perdido, por caldera fuera de servicio.	31
Tabla 9. Pérdidas de calor en la Caldera No 06.....	37
Tabla 10. Porcentaje de pérdidas en la caldera No 06.....	39
Tabla 11. Exceso de aire, según diferentes combustibles.	41
Tabla 12. Coeficiente exceso de aire, % de CO ₂ en los gases secos.	42
Tabla 13. Costo de la fabricación de un economizador.....	44
Tabla 14. Análisis con indicadores económicos para el proyecto economizador.	45
Tabla 15. Cuadro comparativo, Caldera No 06.	46
Tabla 16. Ingreso económico por ahorro de bagazo.	47
Tabla 17. Volumen de gases de combustión.....	49

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de proceso de azúcar.....	6
Figura 2. Caldera Pirotubular.	7
Figura 3. Caldera acuotubular.	7
Figura 4. Partes de un Caldera acuotubular.....	10
Figura 5. Sistema de cogeneración en un ingenio azucarero.	11
Figura 6. Bagazo de caña de azúcar, como combustible.	15
Figura 7. Diseño de ejecución para desarrollo de la investigación.....	20
Figura 8. Vista satelital del Ingenio azucarero Pomalca.	22
Figura 9. Caldera acuotubular No 06	24
Figura 10. Esquema operacional de la Caldera No 06.....	25

Índice de gráficos

Gráfico 1. Generación de vapor Caldera No 06, 2020.	27
Gráfico 2. Tiempo perdido de la Caldera No 06, 2020.	32
Gráfico 3. Pérdidas de calor en la caldera No 06.	38
Gráfico 4. Porcentaje de CO ₂ vs Exceso de aire.	42

Resumen

Mediante este presente trabajo de investigación, se logró análisis, para reducir las pérdidas de calor en la caldera acuotubular No 06, en agroindustrial Pomalca, con ayuda del personal del area de calderas, se recopiló información vital para el desarrollo de la investigación. Se realizó un diagnostico actual de las condiciones de operación de la caldera, con una generación de 21 tn/h, esta caldera tiene la particularidad de tener tubos curvos, con tres domos superiores y uno de lodo, es muy complicado su mantenimiento y reparación.

Se logró cuantificar el flujo másico de combustible, siendo este de 10,74 tn/h, esta caldera utiliza como combustible bagazo, producto de la extracción de la caña de azúcar en trapiche, donde los valores de humedad y sacarosa, influyen mucho en el poder calorífico del bagazo, bajo las condiciones actuales se obtuvo un poder calorífico de 1833 kcal/kg.

Se realizó un analisis de la combustion del bagazo, donde se determinó las pérdidas de calor, donde la mayor pérdida se da por el contenido de humedad del bagazo, donde según datos del laboratorio del ingenio, este valor oscila entre el 47 y 51% de agua en el bagazo, también una considerable pérdida se origina por la salida de los gases de combustion en la chimenea de la caldera, donde esta energía no es aprovechada por los equipos de intercambio de calor.

Gracias a la cuantificación de las pérdidas de calor en la caldera, se calculó la eficiencia actual del generador de vapor, partiendo por el método directo, donde involucra la energía ganada en el vapor sobrecalentado entre la energía aportada por el combustible, siendo la eficiencia del 63%. El método indirecto se calculó mediante las pérdidas de calor encontradas en la calderas, siendo su eficiencia 57%.

Palabras clave: Caldera acuotubular, bagazo, energía, eficiencia.

Abstract

Through the presentation of a research work, log analysis, to reduce caloric losses in the water tube boiler No 06, in the Pomalca agroindustrial, with the help of personnel from the boiler area, it recovers vital information for the development of the research. If a real diagnosis of the operating conditions of the boiler is made, with a generation of 21 tn / h, this boiler has the specificity of having curved tubes, with three upper domains and a weight, it is very complicated in maintenance and repair. .

If the logs quantify the combustible fluid, if it is 10.74 tn / h, this boiler is used as fuel baggage, product of the extraction of the sugar cane in the mill, giving the moisture and sucrose values, greatly influencing the power. caloric. of luggage, both current conditions have a caloric value of 1833 kcal / kg.

If an analysis of the combustion of the luggage is made, where the caloric losses are determined, where the mayor loses it according to the moisture content of the luggage, where the data from the engineering laboratory, this value ranges between 47 and 51% of water in luggage, also a considerable loss originates from the saliva of the combustion gases in the chimney of the boiler, where this energy is not approved by the calorie exchange equipment.

Thanks to the quantification of the heat losses in the boiler, the real efficiency of the steam generator is calculated, calculated by the direct method, where the energy stored in the steam is increased by the energy supplied by the fuel, showing the efficiency 63% . The indirect method calculates the heat losses found in the boilers, with an efficiency of 57%.

Keywords: Water tube boiler, bagasse, energy, efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

Los ingenios azucareros, juegan un rol muy importante en el desarrollo de una nación, donde se procesa el azúcar, alimento vital en el consumo diario, en EE.UU, el departamento de agricultura (USDA), se estima que para el cierre de la campaña 2019/2020, se registrará un volumen de 185,6 millones de toneladas de azúcar, donde el Perú ocupa el puesto 23, aportando al consumo humano 1,350 millones de toneladas.

Estas agroindustrias utilizan un sistema de cogeneración, donde aprovechando el líquido vital, producen vapor de agua, mediante sus generadores de vapor, siendo utilizado como energía mecánica para mover sus turbogeneradores y generar su propia electricidad de acuerdo a su demanda instalada, también aprovechan la energía residual del vapor de escape, para el proceso para obtención de la azúcar doméstica comercial y derivados, como la melaza, alcohol, bioetanol, bagazo entre otros.

Para generar vapor sobrecalentado, cuentan con una batería de generadores de vapor, de tipo acuotubular, por tener una presión o capacidad de trabajo mayor a 20 kg/cm², y alcanzar temperaturas mayores a 270°C, gracias a sus cámaras de combustión donde se quema el bagazo producto de la extracción, o en algunos casos son combinadas, biomasa y combustible fósil.

Para obtener buena operatividad y altos rendimientos en el sistema de cogeneración, las calderas acuotubulares deben estar equipadas y con una buena performance para evitar pérdidas de energía, y tener un alto índice de generación, lograr consumir menos bagazo y generar más vapor.

La región de Lambayeque se caracteriza por el cultivo y producción de azúcar contando con Ingenios, como: Pucallpa, Pomalca, AgroOlmos, Tumbay y Cayaltí, estos últimos en total abandono por problemas sociales. El ingenio de Pomalca, ubicado a 20 minutos del centro de Chiclayo, tiene una capacidad instalada de molinera de 3500 toneladas diarias y una producción de 7000 bolsas de azúcar rubia doméstica, en presentaciones de 50 kg, cuenta un sistema de cogeneración, actualmente operando con dos turbogeneradores con una generación de 7,5 MW, que alimenta a todos sus equipos en fábrica y en campo.

Este trabajo de investigación se desarrolló en el área de Calderas, donde operan cuatro calderas acuotubulares tipo Sterling de tres domos superiores y un domo de lodos, están trabajando en simultáneo, generando 77 toneladas de vapor hora, para alimentar a planta de fuerza.

El caso de estudio es la caldera acuotubular No 06, donde la problemática, son las pérdidas en generación, las cuales merman su eficiencia, cabe mencionar que no existen instrumentos de medición, para cuantificar los flujos masicos que intervienen en el proceso de generación, como: el volumen de gases, producto de la combustión, el flujo real del bagazo como combustible, el flujo de aire comburente, entre otros parámetros, que mediante esta investigación se lograron calcular para determinar las perdidas y conocer su eficiencia actual de generación. Cabe mencionar que tampoco posee control automático de las variables de operación.

Descrita la problemática de la caldera acuotubular No 06, del ingenio de Pomalca, formulamos el problema, con la siguiente pregunta: ¿Según, el análisis a la caldera acuotubular No 06, se logró determinar las perdidas de calor?

Para dar importancia al análisis integral de la caldera, este proyecto se justificó técnicamente mediante la aplicación de los conocimientos adquiridos en mi formación académica, donde se desarrolló una metodología para efectuar los cálculos termodinámicos para cuantificar las pérdidas en la caldera acuotubular No 06.

También se plantearon una serie de medidas o acciones, con el propósito de aumentar el rendimiento actual, y optimizar la operatividad de la misma; por otro lado se logró reunir al personal del área de mantenimiento para recolectar información útil para los cálculos y para evaluar las propuestas de mejora.

En cuanto a la justificación social, se enfocó a la operación de la caldera, donde se logró capacitar al personal en temas de operación y mantenimiento de calderas acuotubulares. Otro tema importante es que al mejorar la eficiencia de la Caldera, se logró contener el material particulado, producto de la combustión incompleta de la caldera, gracias a ello hay un mejor confort de los operarios, es importante conocer que existen enfermedades respiratorias como la neumonitis.

Esta investigación se justificó económicamente, al logró un índice alto de generación, lo que lleva a obtener mejores resultados en cuanto a producción de azúcar, derivados, también al contrarrestar estas pérdidas se logrará consumir menos bagazo, lo que significa mayores ingresos económicos a la empresa y mejores condiciones salariales al personal involucrado. También es importante resaltar que mejorando la eficiencia de la caldera, se evitan multas por contaminación, producto de particulado, lo que también es un ahorro para la empresa.

El tema ambiental es muy importante en este estudio de investigación y se justificó, por las siguientes razones: evitar cantidades de emisiones de gases de combustión y bagazo quemado, la ceniza de las calderas que se obtiene del la quema del bagazo, se puede enviar al campo, para utilizarlo como compostaje, fertilizante. Gracias a las mejoras en el equipo generador de vapor, la empresa podría acoplarse al programa de adecuación y manejo ambiental, conocido por sus siglas PAMA, con el único fin de obtener certificación por el cuidado ambiental.

El objetivo general para esta investigación fue: Análisis, para reducir las pérdidas de calor en la caldera acuotubular No 06, en agroindustrial Pomalca. Se logró el objetivo general desarrollando objetivos específicos, que a continuación se presentan: Realizar un análisis de las condiciones de operación de la caldera acuotubular No 06. Determinar las pérdidas de calor en la caldera acuotubular No 06. Determinar la eficiencia actual de la caldera. Proponer acciones de mejora, para aumentar la eficiencia de la caldera.

Presentados los objetivos de esta investigación, se plantea la hipótesis; mediante el análisis de la caldera acuotubular, se podrá determinar las pérdidas de calor.

II. MARCO TEÓRICO

Para el sustento de este trabajo investigación, existen varias investigaciones que argumentan el análisis para reducir las pérdidas de calor en calderas, a continuación se mencionan algunos trabajos de investigaciones, que argumentan esta investigación:

Risco, R. (2019, p.11), en su investigación, estudio energético a una caldera de tipo pirotubular que utiliza carbón como combustible, menciona que una de las formas energéticas, son los generadores de vapor, cumpliendo un papel muy importante en las industrias, permitiendo generar vapor a raíz del líquido vital que es el agua, gracias al poder calorífico de un determinado combustible, elevando el vapor a temperaturas altas, donde la relación aire / combustible, es un parámetro muy importante. Lo ideal es que la caldera tenga un 15% a 25% de exceso de aire.

Prieto, E. (2017, p.22), en su proyecto de grado “incremento del rendimiento energético de las calderas mediante la recirculación de condensados en una Industria”, donde su problemática es que no cuentan con sistema de recirculación de condensados, por lo cual la Caldera tiene un consumo alto de agua, combustible y productos químicos para tratar el agua, sumado a ello las líneas de retorno no tienen aislamiento térmico.

Otro punto importante que se mencionó en este trabajo, es que el agua de las purgas, no se pueden emplear para alimentar la caldera, por concentrar alcalinidad y dureza.

Cardenas, F. (2019, p.35). realizó una investigación, con título “Diagnostico termodinámico para el desempeño energético del generador de vapor de la universidad de matanzas”, donde se desconoce la relación real entre el consumo de vapor, que demanda la cocción de alimentos en la cocina del comedor universitario, en consecuencia esta problemática dificulta determinar la eficiencia de operación de la caldera, a partir de cálculos termodinámicos al generador de vapor, se logrará obtener el rendimiento, permitiendo establecer la relación entre los gastos de combustible para la generación de vapor, que demanda el comedor.

Laca, S. (2020, p. 17). en su investigación “diseño y balance de energía de una caldera a bagazo, para producir panela, mediante vapor”, donde su investigación,

tiene como objetivo encontrar mejoras con la relación a tecnologías de vapor, en el control de la cantidad de vapor necesaria por cada fase.

Galvis, C. (2018, p.32). desarrolló una investigación “Optimización del sistema de vapor”, donde planteó el objetivo de disminuir los costos de generación de vapor gracias a un balance de combustible, con la intención de disminuir el consumo de carbón y aumentar la alimentación de bagazo como biomasa. Se plantearon métodos para medir el consumo del combustible y control sobre estos, conociendo nuevas alternativas para mejorar su poder calorífico y su energía liberada en la combustión.

Para el desarrollo de la investigación, fue necesario contar con teorías, con las cuales se desarrollaron los objetivos.

Las agroindustrias azucareras, o típicamente llamadas ingenios, desarrollan su proceso de la siguiente manera: Preparación de la caña, donde la materia prima proveniente del campo, llega al patio de fábrica, donde es descargada por medio una grúa hilo, hacia una mesa alimentadora donde es lavada eliminando la tierra y sólidos de los campos de cultivo, esta a su vez la descarga en conductores donde es picada por medio de macheteros, luego pasa a un desfibrador, y finalmente llega al primer molino, y luego se extrae la sacarosa en todo el tándem de molinos, producto de ello sale el jugo y bagazo. Este bagazo sirve como combustible para las calderas que generan vapor sobrecalentado para generar energía mecánica en las turbinas y estas acopladas a generadores producen electricidad para sostener la demanda en fábrica y campo de todos los equipos del ingenio.

En el área de elaboración, se realiza el proceso para la obtención del azúcar, como la alcalización, calentamiento y clarificación del jugo. Luego pasa a los cuerpos evaporadores para obtener la meladura, y cristalización, por último pasa a la centrifugación y envasado del azúcar rubia doméstica.

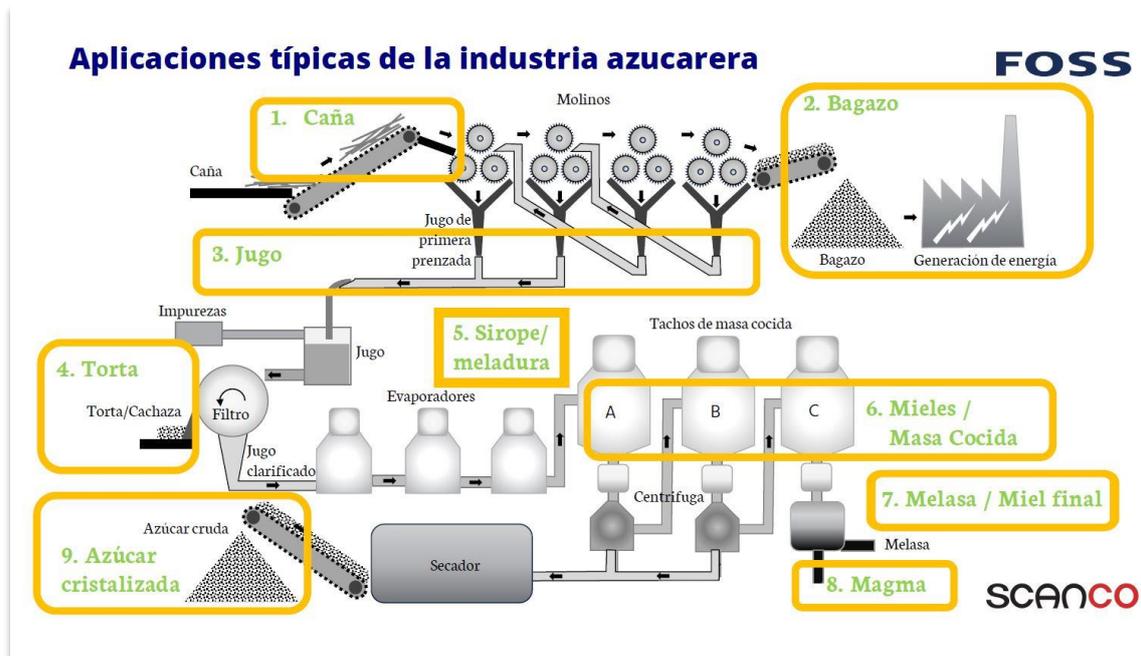


Figura 1. Esquema de proceso de azúcar.

Fuente: SCANCO

Un generador de vapor, es un equipo termico, donde genera y entrega vapor, de calidad, en cantidad para un determinado uso, tambien puede definirse como instalaciones industriales, donde al aplicarse calor a un combustible, ya sea liquido, solido o gaseoso, convierten el agua en vapor saturado o sobrecalentado para diversas aplicaciones en la industria. (Bermudez, L. 2017. p. 25).

Según los especialistas, las calderas se clasifican de acuerdo a diferentes variables, como: el tipo de transmision de calor y combustible, por radiación o convección, por su tipo de operación, según su presión de diseño, pero se dividen en dos grandes grupos, acuotubulares y pirotubulares.

Las calderas pirotubulares, tiene la particularidad de que sus gases calientes producto de la combustión, pasan por el interior de los tubos, y en su interior fluye en agua. El combustible se quema en un horno, donde se tiene lugar a la transimisión de calor. (Kohan, 2000).



Figura 2. Caldera Piro-tubular.

Fuente: DISTRAL, Colombia.

En las calderas acuotubulares ocurre lo contrario, los gases de combustión circulan por el exterior y el agua circula por el interior de los tubos. También están implementadas de equipos de intercambio de calor, como sobrecalentadores, economizadores y calentadores de aire. Cuentan con un hogar donde sus paredes tienen tubos de agua y material refractario (Kohan, 2000).



Figura 3. Caldera acuotubular.

Fuente: CALDEMA, Brazil.

Las calderas acuotubulares, poseen mayor capacidad de producción de vapor, que va desde pequeñas cantidades hasta producciones de 1000 tn/h y con presiones de operación de hasta 150 kg/cm², a estas calderas se le denominan acuotubulares supercríticas. (Lifschitx. 2015. p. 47)

Se describirán los componentes principales, que conforman este tipo de caldera, y su operación de los mismos.

El domo de agua – vapor, recinto donde se produce la fase de separación entre la mezcla agua vapor, en su interior se alojan bandejas rompe olas, separadores ciclónicos, separadores primarios y secundarios, es el encargado del calentamiento de agua de alimentación, también dispone de espacio para el agregado de productos químicos para la calidad de agua, se encuentran alojadas la líneas del nivel de agua o visores de la caldera, y la función más importante es el vínculo de anclaje mecánico para todos los tubos de agua que ingresan en él.

La superficie de calefacción, encargadas de la transferencia de calor, recirculando los gases de combustión para el intercambio con las sustancias de trabajo, agua, aire. Conformada por un banco de tubos, cuya disposición y forma, dependen del diseño y capacidad de la caldera, como también de trabajo.

En el haz convectivo, es el sector donde se realiza la transformación de agua a vapor, implicando que la mezcla de agua/vapor que circula por los tubos, es la que corresponde a la presión de saturación del domo. Predomina la transferencia de calor por convección, algunas calderas poseen una pantalla de tubos, cuya función es proteger a los sobrecalentadores de altas temperaturas y también del ensuciamiento.

El hogar, es el espacio donde se lleva a cabo la combustión, es el medio de transferencia de energía, caracterizado por tener una superficie mayor expuesta a la radiación luminosa. Está delimitado por piso, techo y paredes de agua, proveen el espacio para acomodar la llama, sin que tengan contacto directo con los tubos, se exterioriza por la emisión de humos, mantienen la llama a una alta temperatura, con el propósito de lograr una combustión completa, es un recinto hermético, este hogar está presurizado, evita la entrada de aire del ambiente.

El sobrecalentador, tiene como función incrementar la temperatura del vapor, a la presión del domo, gracias a la ganancia termodinámica, trabajando con un fluido de mayor entalpía, se aumenta el 3% de dicha entalpía por cada 50°C, de vapor sobrecalentado. El vapor utilizado en las turbinas, es totalmente seco, el vapor sobrecalentado tiende a condensarse en las últimas etapas de la turbina. Los sobrecalentadores, se dividen en dos tipos, clasificándose en convectivos instalados de la zona convectiva, radiantes, están ubicados en el hogar, expuestos de manera directa a la radiación, también existen de tipo combinado, utilizando la combinación de ambos tipos de superficie (Lahoz, 2012).

Circuito de agua, encargada de suministrar agua al generador de vapor, mediante una bomba, el agua primero deberá pasar por el economizador, si es que tuviera implementado este equipo la caldera, pasando por los tubos descendentes a colectores inferiores, alimentados por los tubos ascendentes más conocidos como paredes de agua.

El economizador, cuya función es elevar la temperatura de agua de alimentación, inferior a la temperatura de saturación.

Atemperador, es un sistema para descender la temperatura del vapor a los valores establecidos en la operación. Por otra parte, la atemperación directa, consiste en la disminución de la temperatura del vapor sobrecalentado hacia un serpentín instalado dentro del domo.

La purga continua, gracias a la extracción continua de una cantidad de agua proveniente del domo, se logra reducir la concentración de sólidos en el domo inferior, esta cantidad de agua puede controlarse automáticamente mediante la conductividad y medida en ppm de agua en el domo.

Circuito de gases, para realizar la transferencia del calor liberado por el combustible, es necesario extraerlos y hacerlos circular por las diferentes superficies de calentamiento. Este flujo de gases, se origina gracias a la diferencia de presiones en el horno, inducidos por un ventilador. Estos gases recorren, los equipos de intercambio de calor, como el economizador, sobrecalentador, calentador de aire.

Calentador de aire, este equipo permite recuperar los gases de combustión, esta circulación se da gracias a la diferencia de presiones, este aire es ingresado por el ventilador tiro forzado.

Tiro forzado, es el encargado de ingresar el aire primario a la caldera, por debajo de la parrilla para el proceso de la combustión, toma aire del ambiente y lo induce por el calentador de aire, teniendo como función, refrigeración de los tubos del calentador, y calentamiento del aire forzado.

El tiro inducido, tiene la función de generar vacío en el hogar de la caldera, con la finalidad de evacuar los gases de combustión y circularlos por los equipos de intercambio de calor (Kohan, 2000).

Las tendencias actuales para el desarrollo de las calderas industriales, se basan en criterios como: eficiencia, confiabilidad, costo de instalación, impacto ambiental en sus operaciones, flexibilidad de combustibles, que pueden ser fósiles o biomasa, se pueden aplicar a sistemas de cogeneración, parámetros de presión por encima de 10 kg/cm^2 , y temperaturas entre $180 - 510 \text{ }^\circ\text{C}$, reducción del periodo entre el proyecto y puesta en marcha, calderas compactas y seguras, hornos modernos con lecho fluizado, para combustibles sólidos y con una mayor área de calefacción recuperativas (Fernández, 2008).

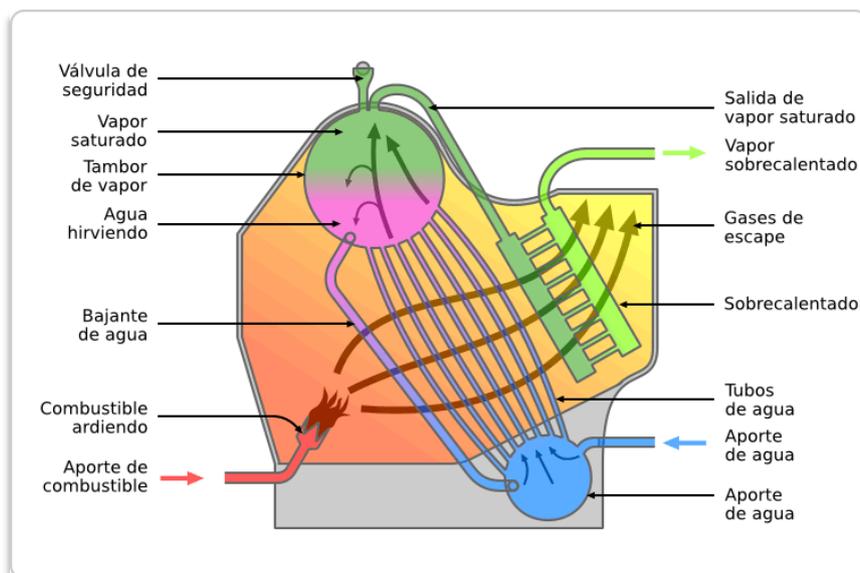


Figura 4. Partes de un Caldera acuotubular.

Fuente: Manual de Calderas Industriales, 2005.

Los sistemas de cogeneración en ingenios azucareros, representan el proceso donde se dan inicio a la transformación y transferencia de la energía, el propósito es suministrar energía para los procesos de obtención de los azúcares y sus derivados, si hubiere excedente de esta energía se vende a la red del sistema interconectado. A este proceso descrito se le denomina cogeneración, estos ingenios obtienen su energía eléctrica y térmica operando sus plantas en ciclos termodinámicos basados en el ciclo Rankine y Rankine con recuperación de calor (Alderetes, 2016).

Mayormente en los ingenios azucareros se lleva a cabo el ciclo de contrapresión o también llamado de escape, donde los turbogeneradores aprovechan el 25 a 40 % de la energía entalpía del vapor, y todo el vapor de escape se envían a fábrica para la elaboración del azúcar en los diferentes cuerpos de evaporación (Muñoz, 2015).

El equipo central donde se origina el vapor como energía térmica es la caldera, que es un fluido utilizado para dar movimiento rotativo a las turbinas de vapor, donde están acopladas a generadores, estos generadores generan propiamente dicho la energía eléctrica, tanto para consumo interno en la planta como uso externo (Alderetes, 2016).

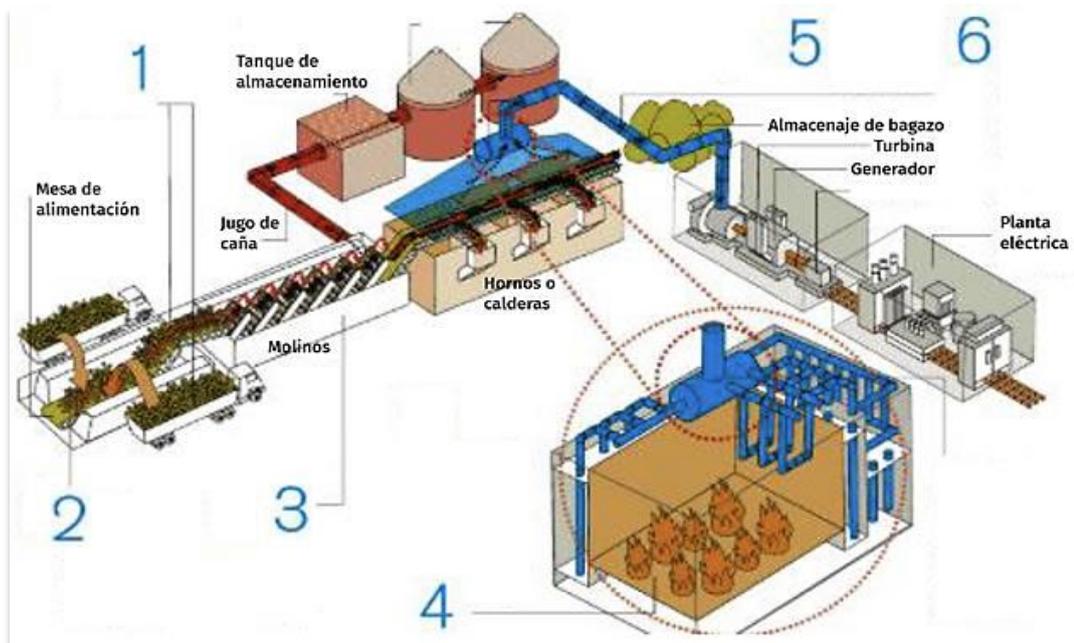


Figura 5. Sistema de cogeneración en un ingenio azucarero.

Fuente: Valoriza Energía, 2015

El rendimiento en una caldera acuotubular, es el cociente entre la energía útil generada por el generador de vapor y la energía gastada. (ASME, 2008). Se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\text{Energía que se quiere obtener}}{\text{Energía que cuesta obtener}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{E_{\text{entrada}}} = \%$$

Eficiencia en calderas acuotubulares, es una medida para determinar el aprovechamiento del combustible por la caldera al generar una cantidad de vapor, la eficiencia siempre será menor al 100%, pero cabe resaltar que algunas pérdidas caloríficas, se pueden reducir al mínimo o eliminarse, mediante la correcta operación y mantenimiento. En conclusión, la eficiencia óptima se obtiene cuando la combustión es completa y se reduce al mínimo las pérdidas en el sistema de generación (Hugot, 1972).

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, se diferencian dos tipos de P.C, el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI). La relación del poder calorífico superior e inferior, de la cantidad de hidrogeno, depende del calor latente de vaporización, y agua en el combustible (Rein, 2012).

El poder calorífico inferior se calcula reduciendo el poder calorífico superior por el calor latente de vaporización del agua formada de la combustión, el contenido de agua y el hidrogeno.

Esta relación para convertir el PCS al PCI es la siguiente:

$$PCI = PCS - h_{fg} * \left(\frac{H_2combustible * 8.937 + H_2Ocombustible}{100} \right) \frac{kJ}{kg}$$

Donde:

h_{fg} = Calor latente de vaporización.

H_2 = Hidrógeno en el combustible

H_2O = Humedad en el combustible

El PCS, es la cantidad de calor obtenida de la combustión completa de la unidad de masa de un combustible, cuando los productos de la combustión han alcanzado una misma temperatura que tenían el aire antes de la combustión (25°C) y el combustible, cuando el agua proveniente de la combustión y de la humedad del propio combustible se encuentren en fase líquida después de la combustión. (Alderetes, 2016).

$$PCS = 4600 - 46 * w - 13 * s = [kcal/kg]$$

Donde:

w = Humedad en el bagazo

s = Pol o sacarosa en bagazo

Poder calorífico inferior, calor obtenido de la combustión completa de la unidad de masa cuando los productos de la combustión han alcanzado la misma temperatura que tenían el aire antes de la combustión (25°C) y el combustible, cuando el agua proveniente de la combustión y de la humedad del propio combustible se encuentren en fase gaseosa, es decir sin haber entregado su calor latente de vaporización (Alderetes, 2016).

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

La relación de ambos poderes caloríficos, ya sea de bagazo seco o húmedo, pueden ser referidos como base seca y base húmeda (Baerhr, 1992)

Están dados por la siguiente expresión:

$$H_s - H_i = r * \left(\frac{9H}{100} + \frac{w}{100} \right)$$

Donde:

w = Humedad en el bagazo

H = Porcentaje de hidrogeno en el bagazo

r = Calor latente de vaporización 540 kcal / kg

El bagazo de caña de azúcar, es el subproducto o residuo, proveniente del proceso de extracción y molienda del mismo. Por ser un compuesto orgánico fibroso, contiene un considerable poder calorífico, que depende de su humedad. En cada temporada de molienda o zafra, la fibra seca de caña oscila entre un 12 a 15 % de su volumen, representando así una oportunidad de generar energía con biomasa (Odar,2016).



Figura 6. Bagazo de caña de azúcar, como combustible.

Fuente: Elaboración propia.

El bagazo, es adecuado para fines de combustión, debido a que es filtrado en el proceso extractivo de molienda, dejando una ceniza rica en sílice. (Rein et al. 2012).

La cantidad o flujo másico de bagazo como combustible, es la cantidad de combustible (bagazo) quemado en kg/h. (Hugot, 1972).

$$m_c = \frac{m_v * (h_{vs} - h_w)}{PCI * \eta}$$

Donde:

m_c = Cantidad de combustible

m_v = Flujo másico de vapor

h_{vs} = Entalpía de vapor

h_w = Entalpía de agua de alimentación

PCI = Poder Calorífico Inferior

η = Eficiencia de la Caldera.

Transferencia de calor en las calderas, forma de energía que se transmite de un cuerpo a otro, como resultado de la diferencia de temperatura (Cengel, 2007).

Conducción, este mecanismo de transferencia de calor se describe mediante la ley de Fourier de la conducción de calor. Se puede expresar de la siguiente expresión:

$$Q_{conducción} = -k * A * \frac{dT}{dx}$$

Donde:

k = Conductividad térmica

A = Área de transferencia de calor

dT/dx = Gradiente de temperatura

Convección, la transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido gaseoso o también líquido, puede ser natural, causada debido a las diferencias de densidad forzada, causada por medio de fuerzas mecánicas. Se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{convección} = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia por convección

A = Área superficial donde se lleva a cabo la convección

dT/dx = Gradiente de temperatura

Radiación: Transferencia directa de calor en energía radiante, emitida por ondas electromagnéticas. Se expresa matemáticamente según la ley de Stefan – Boltzmann de la siguiente manera.

$$Q_{emitida,max} = \sigma * A_s * T_s^4$$

Donde:

σ = Constante de Stefan – Boltzman, igual a 5.67×10^{-8}

A_s = Área superficial donde se lleva a cabo la convección

T_s^4 = Temperatura de la superficie

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de Investigación.

Tipo de investigación: Aplicativa, se pudieron emplear todos los conocimientos adquiridos durante mi formación académica, realizando cálculos termodinámicos, para cuantificar las pérdidas de calor, del generador de vapor acuotubular.

Diseño de la investigación: Se consideró diseño no experimental, del tipo aplicada y descriptiva. Se evaluó el objeto de estudio, para este caso la caldera acuotubular No 06, y se aplicaron calculos para determinar sus pérdidas de energía.

3.2. Variables, operacionalización.

Variante independiente

Análisis de la Caldera acuotubular No 06

Definición concetual

Proceso en cual se realiza un diagnóstico integral de la situación actual del generador de vapor, para identificar los problemas y pérdidas que hay en el sistema.

Definición operacional

Análisis del funcionamiento y operación de la caldera, visualizando parámetros como presión, temperatura, flujo de combustible, gases, aire.

Variante dependiente

Reducir pérdidas de energía de la Caldera acuotubular No 06

Definición concetual

Las pérdidas de calor, en los generadores de vapor, se ve reflejada en los gases de escape, en las insrustaciones en los tubos, en las purgas, por combustión incompleta.

Definición operacional

Las pérdidas de calor, determinan la eficiencia actual de la caldera, suelen darse por falta de mantenimiento, o deficiencia en el sistema de generación.

3.3. Población, muestra y muestreo

Población: Se consideró como población a la caldera acuotubular No 06.

- **Criterio:** Se logró describir a la población, por lo que se considera de criterio inclusivo.

Muestra: La muestra es la caldera acuotubular No 06, por ser una muestra no aleatoria simple. Se define la muestra como “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” Arias (2006, p. 83)

Muestreo: No se aplicó ninguna técnica estadística, por lo tanto el muestreo fue intencionado, por el investigador.

3.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Técnicas de recolección de datos: Se empleó la técnica de la observación, donde se visualizó la operación de la Caldera, No 06. También se empleó la técnica del análisis documental, sirvió como información de soporte para el desarrollo de los objetivos, se consultó libros, revistas técnicas, históricos de mantenimiento de la caldera.

Instrumentos de recolección de datos: Para la toma y registro de datos, se utilizó guía de observación, donde sirvió para el registro de temperatura de los gases de salida en la chimenea de la caldera, también para el registro de los equipos y partes de la caldera y su estado actual. También se utilizó ficha de investigación.

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

TÉCNICA	INSTRUMENTO	OBJETO	OBJETIVO
Observación	Guía de observación	Caldera acuotubular	Se utilizó para realizar observar la condición actual de operación de la caldera acuotubular.
Análisis documental	Ficha de investigación	Caldera acuotubular	Se utilizó, para registrar el consumo de bagazo como combustibles de la caldera, también para registrar el histórico de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Validez y confiabilidad: Para el desarrollo de esta investigación, se consultó con especialista en temas de generadores de vapor acuotubulares, e ingenios azucareros, por lo cual se realizó una interpretación correcta del desarrollo de los objetivos, obteniendo resultados consistentes y coherentes.

3.5. Procedimientos.

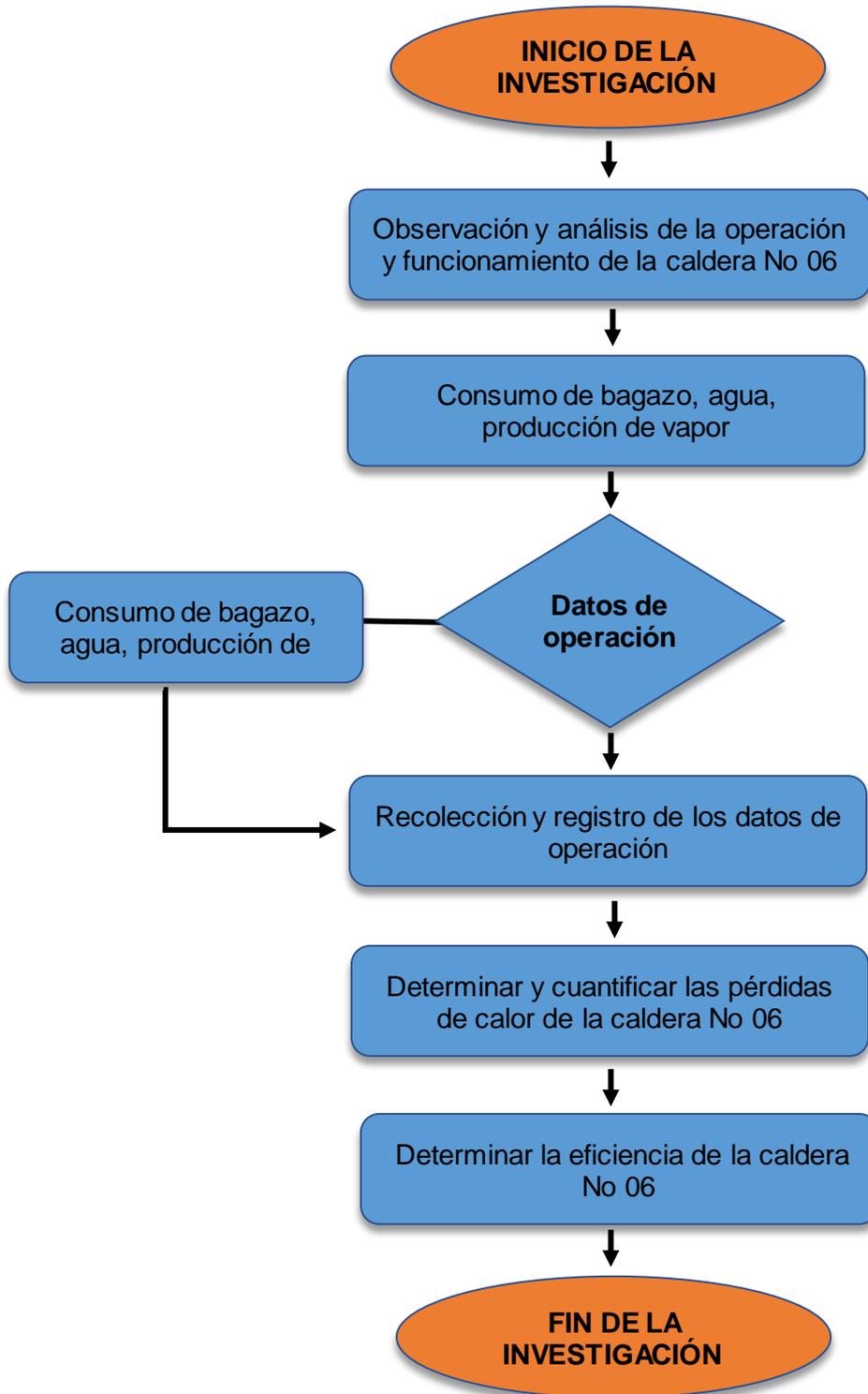


Figura 7. Diseño de ejecución para desarrollo de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Método de análisis de datos.

- Se recibió información del cuerpo de mantenimiento de Calderas, para revisar los históricos de mantenimiento de la caldera, reportes de operación de los tres turnos de trabajo, también se revisaron planos de la caldera.
- Se registraron datos relevantes de la caldera, como temperatura de gases de salida, temperatura de vapor, de agua de alimentación, presión de trabajo de la caldera.
- Se cuantificó el consumo de bagazo y se determinaron las pérdidas de calor de la caldera.
- Con ayuda del programa Microsoft Excel, se realizaron los cálculos, con las diferentes variables, para determinar la eficiencia de la caldera.
- Se propusieron acciones de mejora, para aumentar el rendimiento de la caldera.

3.7. Aspectos éticos

Se respetó la propiedad intelectual de los autores cuyo aporte se menciona en esta investigación. Por otro lado los resultados muestran datos confiables y certeros, validados por especialistas en el tema de investigación.

IV. RESULTADOS

4.1 Se realizó un análisis de la condiciones de operación de la caldera acuotubular No 06.

Ingenio azucarero Pomalca

El presente trabajo de investigación, se desarrolló, dentro de las instalaciones del ingenio azucarero Pomalca, ex cooperativa, cuenta con una capacidad de molienda instalada de 3500 toneladas de caña molida (tcm), y una producción aproximada de 7000 bolsas de 50 kg de azúcar. Tiene un trapiche con un tándem de siete molinos de cuatro masas, cuatro calderas acuotubulares, de tres tambores de vapor superiores y uno de lodos, en la planta de fuerza cuenta con dos turbinas multietápicas de contrapresión, acoplados a generadores, en el área de elaboración cuenta con dos baterías de evaporadores de cuádruple efecto. Cuenta con un sistema de cogeneración, con una demanda 77 toneladas hora de vapor, para producir 7.5 MW. Con un tiempo efectivo de molienda de 21 horas diarias, y un trabajo continuo de 24 días, por 6 de mantenimiento y una parada anual de un mes.

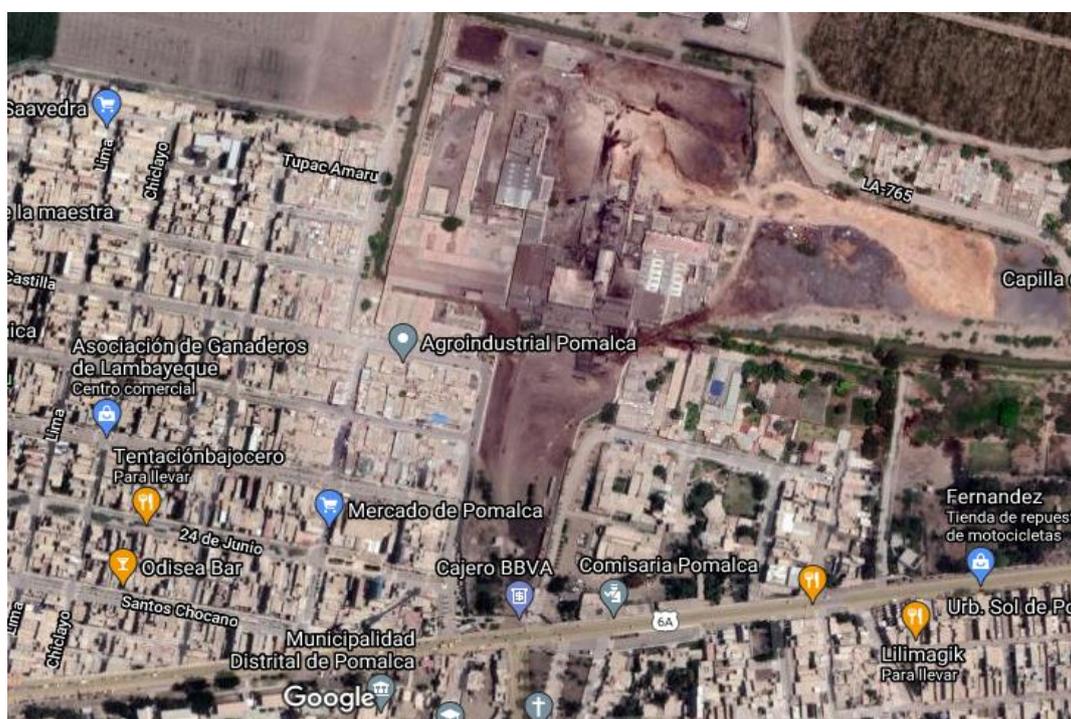


Figura 8. Vista satelital del Ingenio azucarero Pomalca.

Fuente: Google Maps

Tabla 2. *Parámetros de molienda en Ingenio Pomalca.*

PARÁMETROS	CANT.	UNIDAD
Molienda	3500	tcm/d
Ritmo molienda	166	tn/h
Horas efectivas molienda	21	h
Producción azúcar	7000	bolsas
Generación eléctrica	7.5	MW
Generación vapor	77	tn/h
Producción de bagazo	1015	tn/d
Excedente de bagazo	127	tn/d

Fuente: Elaboración propia.

Caldera acuotubular No 06, situación actual operacional.

Con una capacidad de diseño de 30 tn/h de vapor, esta caldera, y con una presión de 40 kg/cm², y una temperatura de 382 °C, utiliza bagazo como combustible, actualmente está generando en promedio 22 tn/h de vapor.

Su modelo Sterling, con tres domos superiores de agua - vapor, y un domo inferior de lodos, es el único modelo de caldera trabajando, otros ingenios decidieron sacarlas de operación, por los tubos curvos que posee, ya que es allí donde se deposita los sólidos que traen el agua de alimentación, en total cuenta con un banco de tubos 640 tubos ASTM 192 de diámetro 3 ¼”.

Otra característica de esta caldera, son sus hornos, u hogares de combustión, tipo herradura, no cuenta con parrilla, donde el bagazo se alimenta en forma de pila. Su operatividad depende de tres motores, el Tiro Inducido, ventilador centrífugo, accionado por un motor de 200 hp, ventilador Tiro Forzado, accionado por un motor de 125 hp, y ventilador aire sobre fuego, de 40 hp y su sistema de alimentación, mediante siete conductores de bagazo, tipo tablilla por cadena de arrastre;

accionados por motorreductores de 40 hp, compuertas mecánicas, accionadas por tres motores de 5 hp.



Figura 9. Caldera acuotubular No 06

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

Parámetros de trabajo

A continuación, se describe en la siguiente tabla, los parámetros de operación actual de la caldera acuotubular No 06.

Tabla 3. Datos de operación de la Caldera No 06.

PARÁMETRO	UNIDAD
Presión	30 kg/cm ²
Generación de vapor	21 tn/h
Temperatura de vapor	310 °C
Combustible	Bagazo
Temperatura de agua	90 °C

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

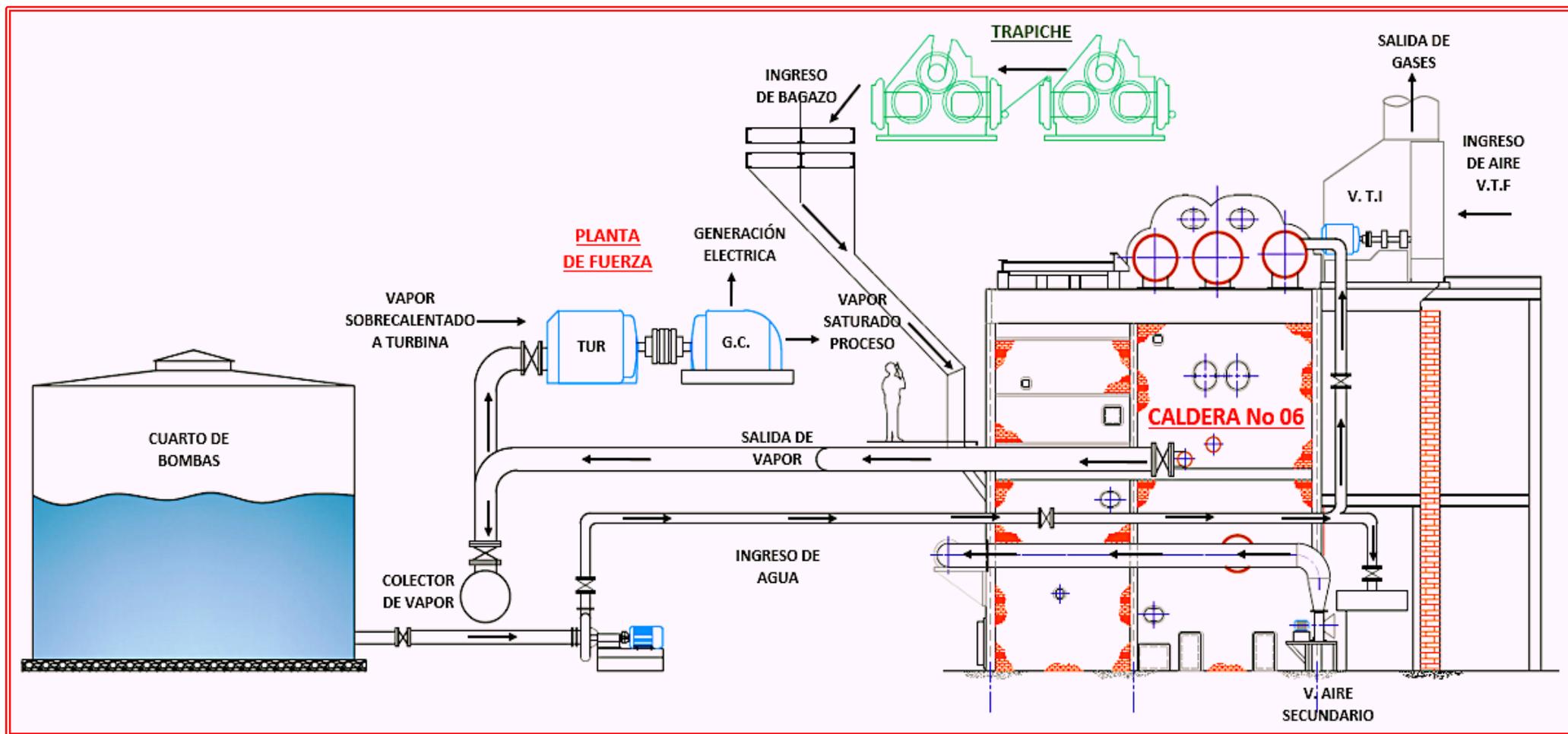


Figura 10. Esquema operacional de la Caldera No 06.

Fuente: Odar D, 2019

Equipos de la Caldera No 06

Tabla 4. Equipos de la caldera acuotubular No 06.

ITEM	EQUIPO	CONDICIÓN
1	Ventilador Tiro Inducido	Operativo
2	Ventilador Tiro Forzado	Operativo
3	Ventilador Air Over Fire	Operativo
4	Alimentadores de Bagazo	Operativo
5	Hogar, tipo Herradura	Operativo
6	Soplador de Hollín	Inoperativo
7	Válvula de Seguridad	Operativo
8	Válvula principal de Vapor	Operativo
9	Economizador	No está instalado
10	Calentadores de Aire	Operativo
11	Sobrecalentador	Operativo
12	Banco de Tubos de Agua	Operativo
13	Domos superiores	Operativo
14	Domo inferior	Operativo
15	Colector de Vapor	Operativo
16	Cenicero	Operativo
17	Mampostería, paredes	Inoperativo
18	Mampostería, bafles	Inoperativo
19	Chimenea	Operativo
20	Purgas	Operativo
21	Válvulas Purga de Fondo	Operativo
22	Compuertas de Aire	Inoperativo

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Caldera.

En la tabla 15, se describe todos los componentes de la caldera No 06, cabe mencionar que algunos equipos que están operativos, no están trabajando eficientemente, por falta de mantenimiento, por trabajo continuo.

A continuación, se detallan los motores que accionan los principales equipos rotativos de la caldera.

Tabla 5. Relación de motores Caldera No 06.

MOTORES CALDERA No 06			
EQUIPOS	HP	AMP	RPM
Ventilador Tiro Inducido	200	270	890
Ventilador Tiro Forzado	125	150	1180
Ventilador Aire Secundario	40	48	1750
Bomba de alimentación agua	450	514	3558
Alimentadores de bagazo	5	9	1200

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

Generación de vapor

Actualmente la caldera No 06, está generando aproximadamente 528 tn/d de vapor, trabajando 16% menos de su capacidad nominal generación. Actualmente la caldera no cuenta con flujómetros de vapor sobrecalentado, por lo que se tomaron datos de planta de fuerza.

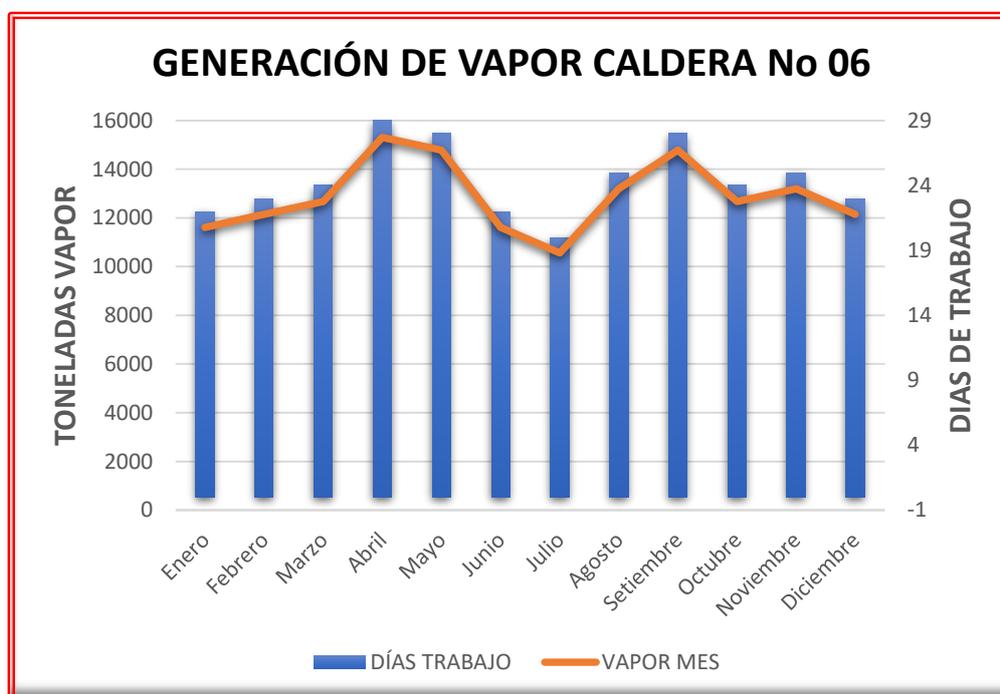


Gráfico 1. Generación de vapor Caldera No 06, 2020.

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

Consumo de bagazo como combustible, en la caldera No 06.

Para lograr encontrar la cantidad de bagazo, actual de la caldera, fue necesario determinar las pérdidas por calor sensible de los gases de combustión, y la energía transmitida al vapor por la combustión de un kg de bagazo.

Pérdidas por calor sensible en los gases

Para efectos de este cálculo, con ayuda de los operadores de la caldera, se tomaron registro de la medición de la temperatura de los gases de salida, en distintos días, para obtener un promedio que nos ayudará a determinar esta pérdida.

Tabla 6. *Medición de temperatura de gases de salida, Caldera No 06.*

MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE GASES DE SALIDA °C						
TURNO	HORA	05/04/21	06/04/21	07/04/21	08/04/21	09/04/21
MAÑANA	06:00	158	160	157	162	161
	08:00	165	159	159	168	158
	10:00	158	154	156	163	163
	12:00	157	166	163	154	155
TARDE	14:00	162	169	155	159	164
	16:00	163	170	168	158	158
	18:00	158	156	165	161	156
	20:00	155	158	166	164	164
NOCHE	22:00	157	154	168	159	157
	00:00	159	162	165	157	158
	02:00	160	161	153	164	156
	04:00	159	167	154	166	157
PROMEDIO DIA		159.25	161.33	160.75	161.25	159
PROMEDIO TOTAL						160.3

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

Conociendo el % de CO₂ en los gases de combustión 14 %, podemos hallar el factor de dilución, o exceso de aire mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{0.1969}{\%CO_2} + 0.118$$

Donde:

γ = Exceso de aire

% CO₂ = 0.14 % de CO₂ en lo gases de salida

$$\gamma = 1.52$$

Otro dato importante es el contenido de humedad en el bagazo, producto de la extracción en el trapiche, gracias a datos de laboratorio del ingenio obtuvimos los siguientes resultados.

Tabla 7. Análisis de bagazo.

ANÁLISIS DE BAGAZO				
FECHA	POL %	HUMEDAD %	CAUDAL m ³ /h	T °C
05/04/2021	2.85	50.3	20	75
06/04/2021	2.75	50	18	80
07/04/2021	2.75	50.1	15	78
08/04/2021	2.3	49.8	18	77
09/04/2021	2.76	50.2	20	76
10/04/2021	2.4	49.9	19	72
11/04/2021	2.93	50.2	20	82
PROMEDIO	2.7	50.07	18.57	77.14

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Laboratorio.

Conociendo el exceso de aire comburente, y el contenido de humedad en el bagazo que ingresa a la caldera, se logró determinar la pérdida de calor sensible mediante la siguiente expresión:

$$q = t(1 - w) \left(1.4 * \gamma + \frac{0.50}{1 - w} - 0.12 \right) * 4.184 = [kJ / kg]$$

Donde:

q = Perdida de calor sensible en los gases

t = Temperatura de los gases en la chimenea 160° C

w = Humedad del bagazo 50 %

γ = Exceso de aire = 1.5

$$q = 997.466 [kJ/kg] \approx 238.2405 [kcal/kg]$$

Cálculo de energía transmitida al vapor

El calor que proporciona la combustión de un kg de bagazo al vapor, está relacionado con las pérdidas de la caldera.

Estas pérdidas, están representadas por coeficientes para efectos de este cálculo, y son:

- 1. Coeficiente de pérdidas por combustión incompleta:** Este coeficiente está relacionado con la humedad del bagazo, la temperatura en el horno de combustión y el exceso de aire.
- 2. Coeficiente de pérdidas por radiación en el horno:** Este coeficiente está relacionado con el aislamiento de la caldera.
- 3. Coeficiente de pérdidas por sólidos no quemados:** Este coeficiente está relacionado con el tiro inducido de la caldera.

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

Donde:

Q = Calor transmitido al vapor kJ/Kg

w = Humedad del bagazo 0.50 %

q = Pérdida de calor sensible en los gases 997.466 kJ/kg

α = Coeficiente que incluye las pérdidas en los sólidos no quemados 0.98

β = Coeficiente que incluye las pérdidas debidas a la radiación 0.91

η = Coeficiente que incluye las pérdidas combustión incompleta 0.92

$$Q = 5446.46 \text{ [kJ/kg]} \approx 1300.864 \text{ [kcal/kg]}$$

Entonces el flujo másico de bagazo como combustible, de la caldera No 06, fue:

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

Donde:

m_c = Consumo de combustible kg/s

m_v = Flujo másico de vapor = 21 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado 3162.77 kJ/kg

h_a = Entalpia de agua de alimentación 377.039 kJ/kg

Q = Calor transmitido al vapor = 5446.46 kJ/kg

El flujo de combustible para la caldera será:

$$m_c = 2.983 \text{ [kg/seg]} \approx 10.74 \text{ [tn/h]}$$

4.2 Se determinaron las pérdidas de calor, en la caldera acuatubular No 06.

Con ayuda del registro histórico de tiempo perdido de la caldera No 06, se logró determinar la cantidad de horas de paradas imprevistas que tuvo la caldera en el año.

A continuación, la siguiente tabla muestra los problemas, que fueron la causa del tiempo perdido en la caldera, y el tiempo total efectuado en reparar el equipo, o revertir la situación.

Tabla 8. *Tiempo perdido, por caldera fuera de servicio.*

PROBLEMA	HORAS PERDIDAS	% TIEMPO PERDIDO
Empaques válvulas	9.6	4.94
Tubo de agua roto	128	65.97
Niveles de agua	6	3.09
Tiro Inducido	6	3.09
Mampostería	2.4	1.23

Tiro Forzado	3	1.54
Tubo roto vapor	33	17.01
Bomba de alimentación	6	3.09
TOTAL	194	100

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

Según el cuerpo de mantenimiento del área, la caldera, presenta un alto contenido de incrustación en los tubos de agua, debido a que no se cuenta con desaireador, ni con planta de tratamiento, su alimentación de agua depende de los condensados producto de la evaporación de jugo y meladuras, en los cuerpos de cocimiento en el área de elaboración.

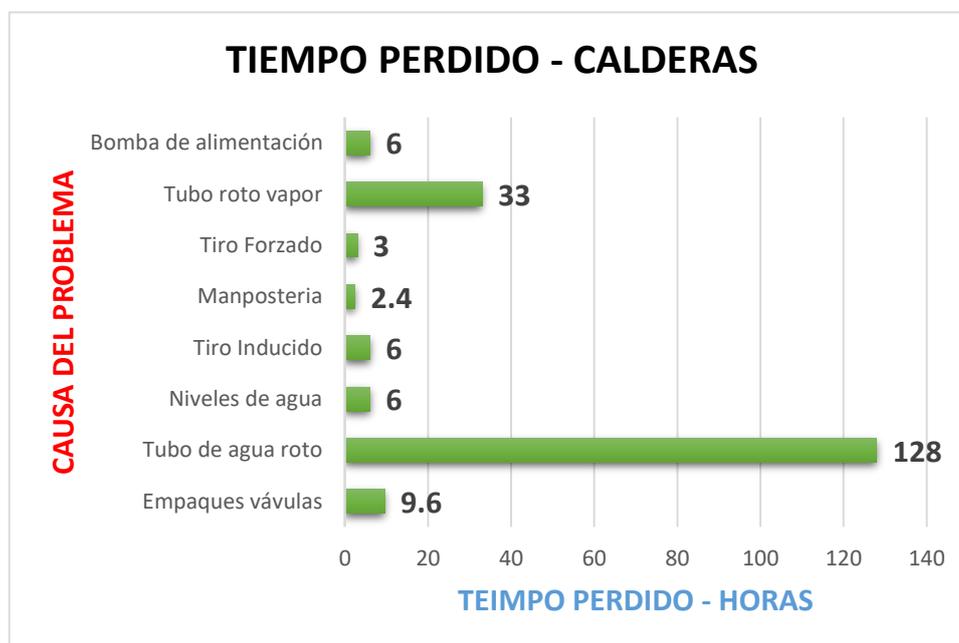


Gráfico 2. Tiempo perdido de la Caldera No 06, 2020.

Fuente: Agroindustrial Pomalca, Calderas.

Reacciones de la combustión del bagazo



$$1 \text{ k mol C} + a \text{ k mol O}_2 = 1 \text{ k mol CO}_2$$

$$12.01 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 = 44.01 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg C} + 2.664 \text{ kg O}_2 = 3.664 \text{ kg CO}_2$$



$$1 \text{ k mol H}_2 + \frac{1}{2} \text{ k mol O}_2 = 1 \text{ k mol H}_2\text{O}$$

$$2.02 \text{ kg H}_2 + 16 \text{ kg O}_2 = 18.01 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg H}_2 + 7.937 \text{ kg O}_2 = 8.937 \text{ kg H}_2\text{O}$$

Aire requerido o teórico

$$\text{O}_2 \text{ mínimo} = 2.664 * \text{C} + 7.937 * \text{H}_2 - \text{O}_2$$

$$\text{O}_2 \text{ mínimo} = 0.6639 \text{ kg O}_2 / \text{kg de bagazo}$$

$$\text{Aire mínimo} = \text{O}_2 \text{ min} / 0.232$$

$$\text{Aire mínimo} = 2.8616 \text{ kg aire} / \text{kg de bagazo}$$

Aire real para la combustión

$$\text{Aire real} = 2.8616 * \lambda = \text{kg de aire} / \text{kg de bagazo}$$

Donde:

$$\lambda = \text{Exceso de aire } 1.5$$

$$\text{Aire real} = 4.3 \text{ kg de aire} / \text{kg de bagazo}$$

Composición de los gases (humos)

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_2 * \text{C}$$

$$\text{CO}_2 = 0.86 \text{ kg CO}_2 / \text{kg de bagazo}$$

$$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{O} * \text{H}_2 + w$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0.79 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg de bagazo}$$

$$\text{O}_2 = 0.232 * (\lambda - 1) * 2.8616$$

$$\text{O}_2 = 0.3319 \text{ kg O}_2 / \text{kg de bagazo}$$

$$\text{N}_2 = 0.768 * \lambda * \text{aire real}$$

$$N_2 = 3.3 \text{ kg } N_2 / \text{ kg de bagazo}$$

Volumen de los gases

$$CO_2 = \frac{0.86 \text{ kg } CO_2/\text{kg bag} * 1 \text{ k mol } CO_2}{44.01 \text{ kg } CO_2} * 22.414 \text{ m}^3 CO_2/\text{kg mol } CO_2$$

$$CO_2 = 0.438 \text{ m}^3 CO_2/\text{kg de bagazo}$$

$$O_2H = \frac{0.79 \text{ kg } O_2H/\text{kg bag} * 1 \text{ k mol } O_2H}{18 \text{ kg } O_2H} * 22.414 \text{ m}^3 O_2H/\text{kg mol } O_2H$$

$$CO_2 = 0.9837 \text{ Nm}^3 CO_2/\text{kg de bagazo}$$

$$O_2 = \frac{0.6638 * (m - 1) \text{ kg } O_2/\text{kg bag}}{32 \text{ kg } O_2} * 22.414 \text{ m}^3 O_2/\text{kg mol } O_2H$$

$$O_2 = 0.4649 * (\lambda - 1) \text{ m}^3 CO_2/\text{kg de bagazo}$$

$$O_2 = 0.2324 \text{ Nm}^3 CO_2/\text{kg de bagazo}$$

$$N_2 = \frac{2.20 * m \text{ kg } N_2/\text{kg bag}}{28 \text{ kg } N_2} * 22.414 \text{ m}^3 O_2H/\text{kg mol } O_2H$$

$$N_2 = 1.7611 * m \text{ m}^3 N_2/\text{kg de bagazo}$$

$$N_2 = 2.641 \text{ m}^3 N_2/\text{kg de bagazo}$$

Por lo tanto, el volumen total de los gases es:

$$\sum \text{ gases} = 0.438 + 0.9837 + 0.2324 + 2.641$$

$$\sum \text{ gases} = 4.295 \text{ m}^3 \text{ gases}/\text{kg de bagazo}$$

Calor de los gases secos de la combustión

Donde:

T = Temperatura de gases a la salida de la caldera = 160 °C

$$C_p \text{ CO}_2 = 18.036 - 0.0000447 * T - 158.08 * T^{-1/2}$$

$$C_p \text{ CO}_2 = 5.532 \text{ kal/k mol } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ N}_2 = 6.529 - 0.001488 * T - 0.000000227 * T^{-1/2}$$

$$C_p \text{ N}_2 = 6.77 \text{ kal/k mol } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ O}_2 = 6.732 - 0.001505 * T - 0.000000179 * T^{-1/2}$$

$$C_p \text{ O}_2 = 6.491 \text{ kal/k mol } ^\circ\text{C}$$

Poder calorífico inferior del bagazo

Donde:

w = Humedad del bagazo 50 %

s = Sacarosa en bagazo 2.7 %

$$\text{PCI} = 4324 - (12.3 * s) - (49.04 * w)$$

$$\text{PCI} = 1833.87 \text{ kcal/kg}$$

Pérdida de calor en los gases secos

Se realizó el cálculo de la pérdida por el calor sensible de los gases de salida, para determinar el consumo de bagazo en la caldera No 06.

$$q_1 = 238.2405 \text{ kcal/kg}$$

Pérdida debido a la humedad del bagazo

Donde:

w = Humedad en el bagazo 0.5

T_f = Temperatura del bagazo 35 °C ≈ 95 °F

T_g = Temperatura de gases en la chimenea 160 °C ≈ 320 °F

$$q_2 = \frac{w * (1089 - T_f + 0.46 * T_g)}{1.8}$$

$$q_2 = 317 \text{ kcal/kg}$$

Perdida de calor por evaporación del hidrógeno en el bagazo

Donde:

H = kg de hidrogeno por kg de bagazo 0.325

$$q_3 = \frac{9 * H * (1089 - T_f + 0.46 * T_g)}{1.8}$$

$$q_3 = 185.46 \text{ kcal/kg}$$

Pérdida por la combustión químicamente incompleta

Donde:

C = Peso del carbono en 1 kg de bagazo 0.235

%CO₂ = % de CO₂ en la combustión 14 %

%CO = CO en la combustión, asumiremos 0.4 %, para calderas con horno de pila.

$$q_4 = \frac{\frac{CO}{CO_2 + CO} * C * 10160}{1.8}$$

$$q_4 = 36.845 \text{ kcal/kg}$$

Pérdida de calor por combustión mecánicamente incompleta

En calderas a bagazo, oscila esta pérdida oscila entre 1 – 4 %. Se asume 2 % del poder calorífico del bagazo.

$$q_5 = 36.66 \text{ kcal/kg}$$

Perdida de calor perdido por radiación y convección

Esta pérdida está en función al estado en que esta la infraestructura refractaria y aislamiento térmico de la caldera, la cual de registrar una pérdida de 1.75% del PCI.

$$q_6 = 32 \text{ kcal/kg}$$

Las pérdidas de calor de la caldera acuotubular No 06, son:

$$\sum q_p = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

$$\sum q_p = 846.2 \text{ kcal/kg}$$

Tabla 9. *Pérdidas de calor en la Caldera No 06.*

PÉRDIDAS DE CALOR EN LA CALDERA No 06	
PÉRDIDAS	kcal / k g
Pérdida de calor en gases secos	238.24
Pérdida debido a la humedad del bagazo	317
Pérdida debido al hidrogeno en el bagazo	185.46
Pérdida por combustión química incompleta	36.845
Pérdida por combustión mecánica incompleta	36.66
Pérdida por radiación y convección	32
Total	846.2

Fuente: Elaboración propia.

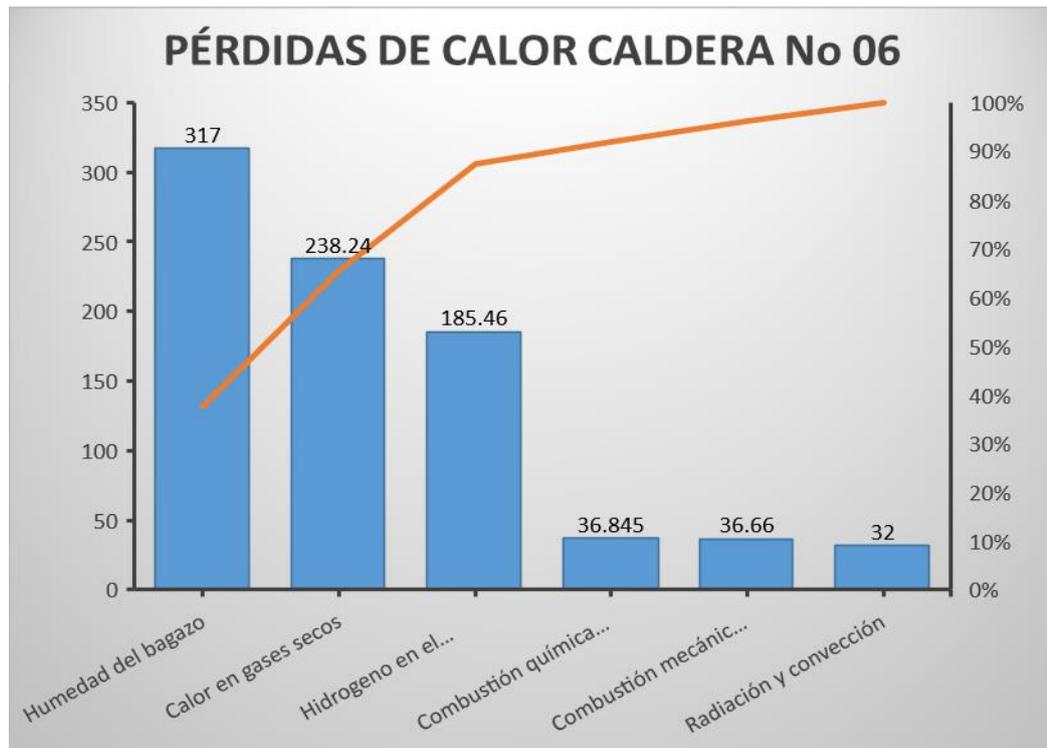


Gráfico 3. Pérdidas de calor en la caldera No 06.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Se determinó la eficiencia actual de la caldera.

Método directo

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

Calor total aprovechado

$$Q_a = m_v * (h_v - h_w)$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor 20 tn/h

h_{vs} = Entalpia de vapor sobrecalentado a 310 °C y una presión de trabajo de 28 kg/cm² = 3019.42 kJ/kg

h_a = Entalpia de agua de alimentación entrando al domo a una temperatura de 95 °C = 398 kJ/kg

$$Q_a = 55041 \text{ kJ/h} \approx 13146 \text{ kcal/h}$$

Rendimiento actual de la Caldera

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

Donde:

Q_a = Calor total aprovechado 52428.4 kJ/h

PCI = Poder calorífico inferior del bagazo 7674 kJ/h

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera 10.74 tn/h

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

$$\eta = 0.66 \approx 66 \%$$

Método Indirecto

Teniendo como energía total aprovechada el PCI, podemos encontrar la eficiencia, donde cada pérdida de calor la referimos como un % del PCI

Tabla 10. Porcentaje de pérdidas en la caldera No 06

PÉRDIDAS DE CALOR EN LA CALDERA No 06		
PÉRDIDAS	kcal / k g	%
Pérdida de calor en gases secos	238.24	8.46
Pérdida debido a la humedad del bagazo	317	17.29
Pérdida debido al hidrogeno en el bagazo	185.46	10.11
Pérdida por combustión química incompleta	36.845	2.33
Pérdida por combustión mecánica incompleta	36.66	3
Pérdida por radiación y convección	32	1.75
Total	846.2	43
PCI	1833	100

Fuente: Elaboración propia.

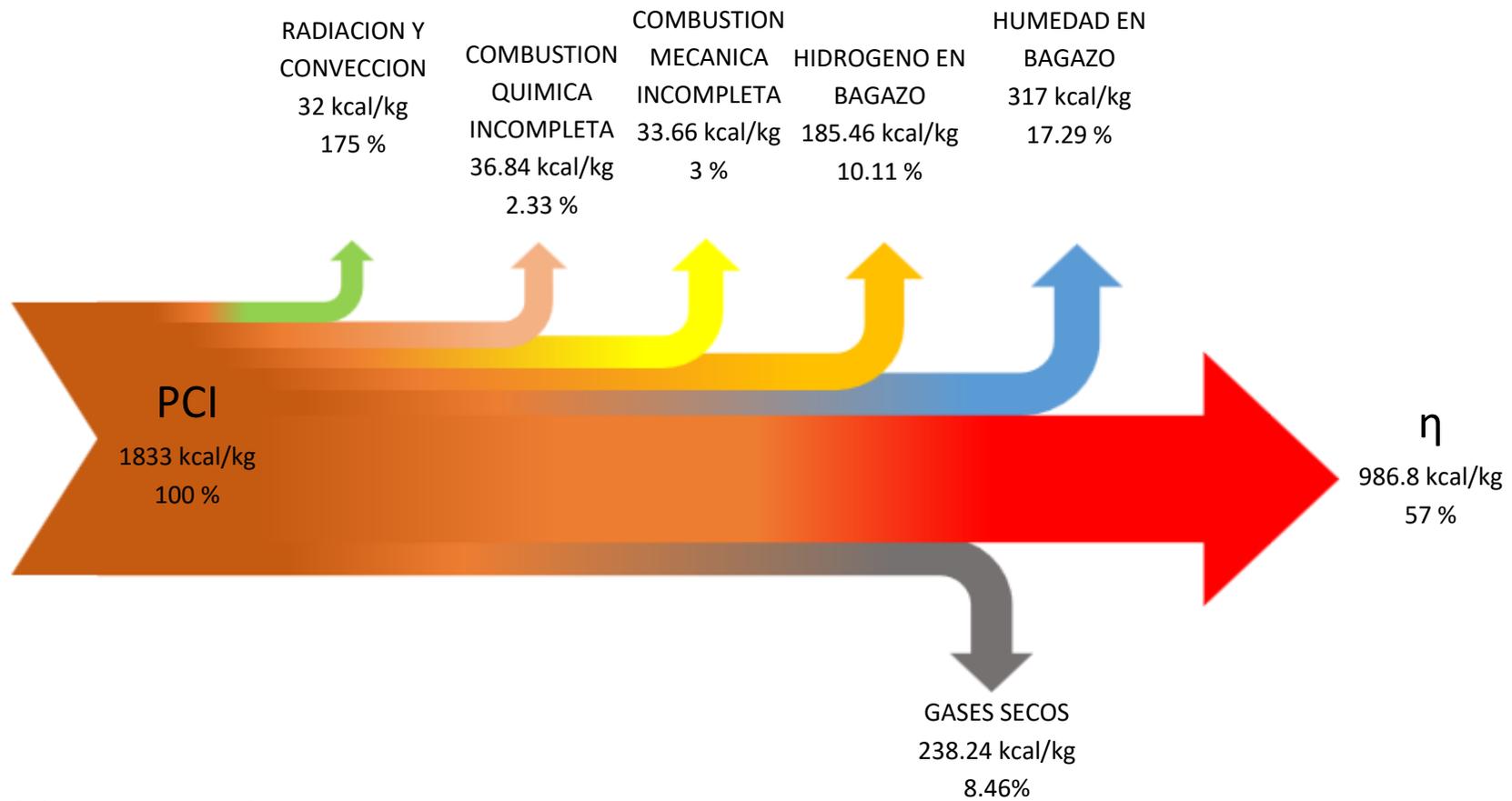


Gráfico 4. Diagrama pérdidas de calor en caldera No 06

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Se presentaron propuestas para mejorar la eficiencia de la Caldera

Reducción del exceso de aire

El exceso de aire primario en un caldera, influye directamente en los gases de combustión (CO₂) y en consecuencia en el rendimiento de la caldera, el porcentaje recomendable, depende del estado físico del combustible.

Tabla 11. Exceso de aire, según diferentes combustibles.

COMBUSTIBLE	TIPO DE HORNO	EXCESO DE AIRE %
Carbón pulverizado	Hogar enfriado por agua.	15 _ 20
	Hogar parcialmente enfriado por agua.	15 _ 40
Carbón Aglomerado	Hogar ciclón	10 _ 15
	Presión, succión	
Carbón	Quemado por parrilla	15 _ 50
	Tiro forzado	50 _ 65
	Tiro natural	_
Aceite	Quemador de aceite	05 _ 10
Combustible	Quemador multi combustible	10 _ 20
Bagazo	Todos los hornos, hogares	25 _ 35

Fuente: Babcock & Wilcox.

Este coeficiente, servirá para enfriar la llama de combustión, aumentando el volumen de los gases, donde se tendría que evacuarse a mayor velocidad, lo cual se traduce en bajo rendimiento.

La caldera No 06, no tiene control automático del ingreso del aire sobre fuego, porque se puede regular manualmente con ingreso del aire en un 40%, cerrando gradualmente la compuerta.

Tabla 12. Coeficiente exceso de aire, % de CO₂ en los gases secos.

EXCESO DE AIRE	CO ₂ EN GASES SECOS
0	20.20%
10	18.40%
20	16.80%
30	15.50%
40	14.80%
50	14.10%
60	13.80%
70	12.60%
80	11.90%
90	10.60%
100	10%

Fuente: Hugoth, 1983.

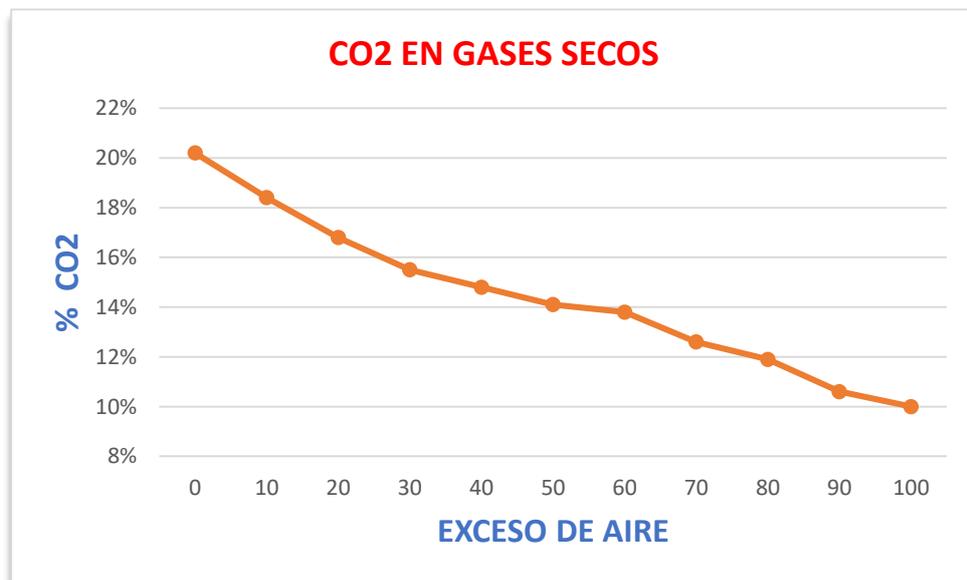


Gráfico 5. Porcentaje de CO₂ vs Exceso de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Acciones para reducir las pérdidas de calor

Con ayuda de un especialista se recomendó realizar las siguientes acciones:

- Verificar las superficies de calefacción.
- Limpiar las incrustaciones en el banco de tubos de agua.
- Limpiar el hollín acumulado en la tubería lado gases.
- Reparar el material refractario de los baffles y cortinas que direccionan los gases de combustión.
- Reducir las purgas, no excediendo el límite recomendado, mayor a 2500 ppm.
- Mejorar la calidad de agua.
- Realizar lavados químicos, para remover las incrustaciones internas de la tubería de agua.
- No prolongar el tiempo de limpieza de hornos, no mayor a 15 min.

Implementar un economizador

La temperatura de agua condensada utilizada en la caldera es de 95 °C, por lo que es necesario elevarla para su posterior vaporización; entonces se puede aprovechar los gases de combustión, para realizar el salto de temperatura.

Esta propuesta consiste en la instalación de un economizador, un paquete de serpentines; donde el agua de alimentación entra 90 °C, utilizando la energía calorífica de los gases se puede elevar el agua hasta 160 °C.

La energía para lograr evaporar 1 ton/h de agua con una temperatura de 90°C en la caldera con una presión de trabajo de 30 bar es:

$$Q_w = m_w(h_v - h_w) = 660 \text{ [kcal/h]}$$

Q_w = Energía de necesaria para evaporar agua (1 tn /h) kcal / h

m_w = Flujo másico de agua 1 tn/h

h_v = Entalpía de vapor saturado. 755,92 kcal / kg

h_w = Entalpía de agua de alimentación. 95 kcal / kg

Implementado el equipo economizador, elevará el gua de alimentación de 95 a 160°C, por lo tanto la energía requerida será:

$$Q_e = m_w(h_v - h_e) = 594[kcal/h]$$

h_e = Entalpia del agua precalentada en el economizador 161 kcal / kg

Q_e = Energía de necesaria para evaporar agua (1 tn /h) kcal / h

Tenemos como datos:

w = Humedad del bagazo (0.5)

PCI = 1793.34 kcal /kg

η = Rendimiento de la caldera con exceso de aire 0.4 %

Entonces podemos obtener un ahorro de bagazo (kg bagazo / ton agua)

$$a_b = \frac{Q_w - Q_e}{PCI * \eta} = 63.46[kg \text{ bagazo} / \text{tn agua}]$$

a_b = Ahorro en bagazo kg bagazo / ton agua

Consumo de bagazo con economizador

La caldera No 06 tiene un consumo de 21 tn/h de agua; teniendo un ahorro en consumo de bagazo de 1332 kg de bagazo hora.

Entonces, el consumo de bagazo instalando un economizador será de 9.408 tn/h.

Análisis de costos del proyecto implenetación de un economizador

Tabla 13. Costo de la fabricación de un economizador.

COSTO DE LA INVERSIÓN PROYECTO ECONOMIZADOR	
Costo de materiales para confección del economizador	S/. 86,957.00
Costo de alquiler de equipos para la confección del economizador	S/. 6,800.00
Costo de la mano de obra para la confección del economizador	S/. 13,600.00

Costo de la mano de obra para el montaje del economizador	S/. 2,460.00
Costo Total	S/. 109,817.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Análisis con indicadores económicos para el proyecto economizador.

INDICADORES	AÑO 0	AÑO 1
EGRESOS	S/109,817.00	S/1,680.00
INGRESOS	0	S/161,118.72
FLUJO EFECTIVO	-S/109,817.00	S/159,438.72
TASA DESCUENTO		15%
VALOR ACTUAL NETO - VAN		S/28,825.37
TASA INTERNA DE RETORNO - TIR		45%

Fuente: Elaboración propia.

La implementación del economizador se considera como una inversión a mediano plazo.

Gracias a la implementación del economizador se ahorrará bagazo 27.92 tn/d lo que representa un ingreso económico de S/161,118.72 anuales, por lo tanto, este proyecto tendrá un tiempo de retorno de 8.18 meses, resultando ser muy viable. Este es un proyecto de mejora se presentó a la gerencia de la empresa siendo su implementación a mediano plazo.

4.5 Se logró reducir las pérdidas de calor, con las propuestas de mejora

Gracias a las propuestas de mejora, se logró aumentar el rendimiento de la caldera No 06, reduciendo el exceso de aire en un 10% (1.4), e implementando un economizador, donde se aprovecharán el calor de los gases producto de la combustión, con la finalidad de elevar la temperatura del agua de alimentación de la caldera de 95°C a 160°C.

Gracias a las propuestas de mejora el rendimiento de la caldera, por el método directo, será:

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

Donde:

Q_a = Calor total aprovechado 52428.4 kJ/h

PCI = Poder calorífico inferior del bagazo 7674 kJ/h

m_{cb} = Consumo de bagazo en la caldera con un 40% de exceso de aire e implementado un economizador 9,4 tn/h

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

$$\eta = 0.72 \approx 72 \%$$

Análisis comparativo de la caldera, con las propuestas de mejora

La siguiente tabla, muestra la eficiencia actual de la caldera No 06 con las mejoras presentadas.

Tabla 15. Cuadro comparativo, Caldera No 06.

CALDERA No 06			
PARAMETROS	ACTUAL	MEJORADO	UNIDAD
Presión de Trabajo	30	30	bar
Generación de vapor	21	21	tn
Agua de Alimentación	90	160	°C
Consumo de Bagazo	10.74	9.4	tn / h
Exceso de aire	50	40	%
Ahorro de bagazo	0	28.14	tn / d
Eficiencia	72	66	%

Fuente: Elaboración propia.

Gracias a las mejoras de propuesta se logró aumentar la eficiencia en un 6%, los calculos efectuados se realizaron con el método directo.

En cuanto a la recuperación de la inversión de las mejoras realizadas, esta se verá reflejada en el ahorro del combustible. Teniendo en cuenta que el costo actual de la tonelada de bagazo es S/. 24.00.

Tabla 16. *Ingreso económico por ahorro de bagazo.*

AHORRO ECONÓMICO			
CONCEPTO	DIA	MENSUAL	ANUAL
Ahorro de bagazo (Ton)	28.14	675.36	7428.96
Ingreso (S/.)	562.80	13 507.20	148 579.20

Fuente: Elaboración propia.

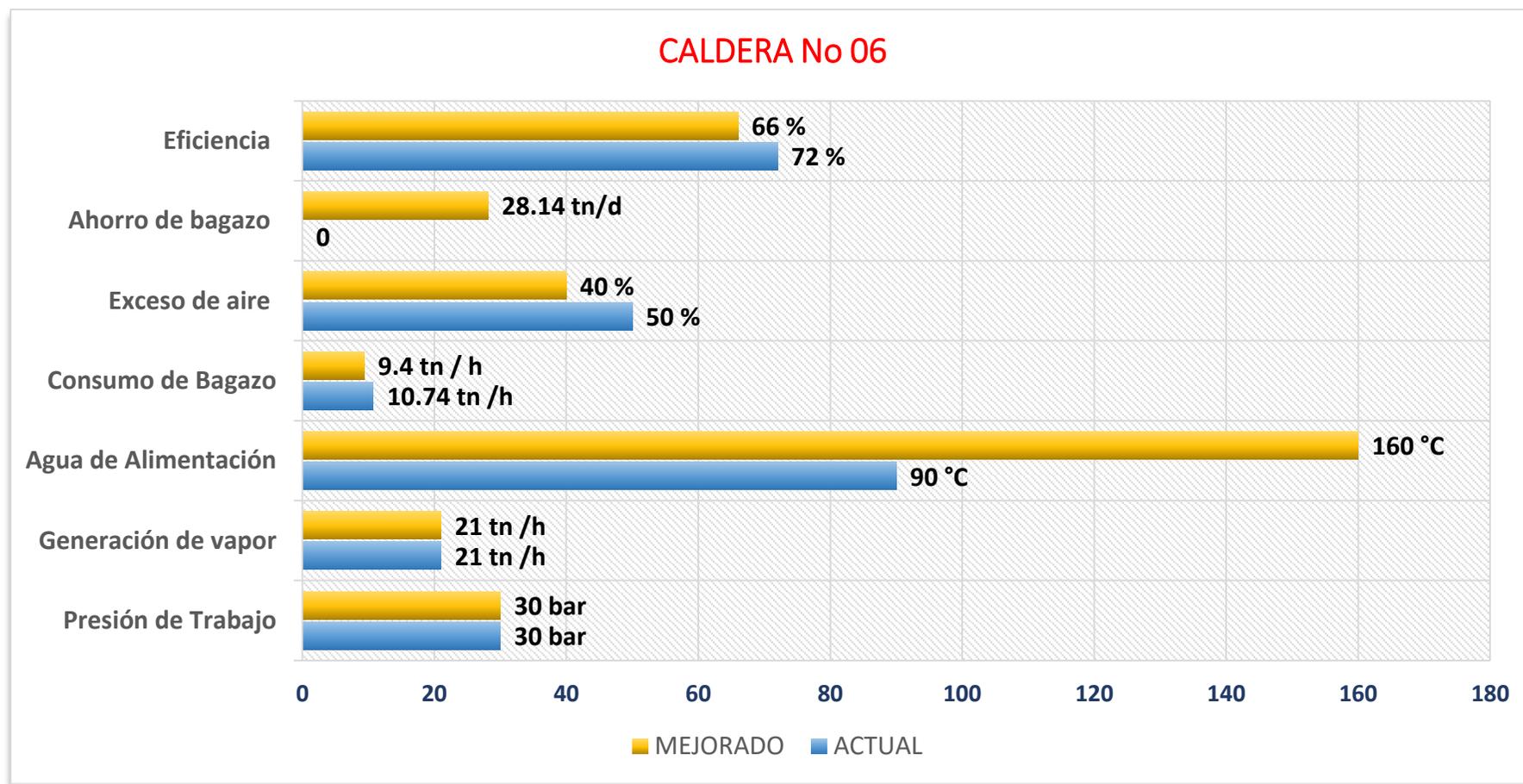


Gráfico 6. Gráfica comparativa de la Caldera No 06.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al impacto ambiental de las mejoras que se propusieron, con un 40 % de exceso de aire y la implementación de un economizador, se reducirá la cantidad de gases de combustión, teniendo en cuenta el calculo del volumen de los gase de combustión tenemos, 4.295 Nm³/kg bagazo, con un consumo menos de bagazo 9.4 tn/h, el volumen de los gases será menor al actual.

Tabla 17. *Volumen de gases de combustión.*

VOLUMEN DE GASES DE COMBUSTIÓN		
ACTUAL	46.1283	Nm ³ /kg de bag
MEJORADO	40.373	Nm ³ /kg de bag

Fuente: Elaboración propia.

Estos gases de salida, será aprovechados por el economizador, para incrementar la temperatura del agua que ingresa a la caldera.

V. DISCUSIÓN

Se tomaron los datos de los gases de salida en la chimenea, con ayuda de un pirómetro se registraron las temperaturas de una determinada semana, en los tres turnos de operación, cada dos horas, obteniendo un valor en promedio de 160 °C, este valor sirvió para el cálculo de pérdida del calor sensible en los gases de combustión.

En la investigación de Risco, R (2019, p.50), desarrolló un análisis energético de una Caldera pirotubular, recopiló datos de solo dos días de operación, lo que arroja un valor menos aproximado. Cabe resaltar que la temperatura aceptable de los gases de salida está entre 155 °C y 180 °C; un valor por debajo de los 150 °C, tiende a aparecer el punto rocío de los gases de combustión, donde contiene azufre, como consecuencia crea daños a los equipos de transferencia de calor, al condensarse el SO₂.

Un punto muy importante en el rendimiento de la caldera es la temperatura del agua como líquido de transformación; Prieto, E (2017, p. 59) desarrolló su investigación centrándose en la influencia de la recirculación de condensados en la eficiencia de una caldera, donde para su caso de estudio, la temperatura de agua de alimentación a la caldera es de 20 °C, aportando solo 83,96 kJ / kg, en su propuesta él planteó implementar la recirculación de condensados, producto de la elaboración de la leche, y de las purgas, logrando incrementar la temperatura del agua a 70 °C, aportando 293 kJ /kg.

Concuerdo con el planteamiento de Prieto, E; en el ingenio donde se llevó a cabo la investigación, opera bajo un sistema típico de cogeneración, donde el vapor sobrecalentado de la caldera No 06, es enviado a la turbina, con una temperatura de 350 °C, a una presión de 29 bar, luego ser utilizado como energía mecánica, el vapor saturado de escape es utilizado como energía térmica, con una temperatura de 120 °C, para el cocimiento de jarabes y meladuras para la obtención del azúcar, aprovechándose el agua condensada, producto de la evaporación, llegando a la sala de bombeo de la caldera, con una temperatura de 90 °C, aportando 377 kJ / kg, contribuyendo al rápido proceso de ebullición del agua.

El agua condensada que llega desde el área de la oración es impulsada a presión constante 40 bar, gracias a una Turbo bomba de 400 HP de marca Worthington. Para lograr un aumento de temperatura y acelerar el proceso de generación de vapor las calderas modernas utilizan equipos de intercambiador de calor llamados economizadores que utilizan la energía calorífica de los gases residuales para calentar el agua de alimentación en algunos casos eleva la temperatura hasta 160 °C.

Un parámetro que influye directamente en la eficiencia de la caldera es el contenido de humedad del bagazo como combustible, cabe resaltar que toda la energía aportada se da por el poder calorífico inferior del bagazo, para Laca, S (2020, p. 91), en su investigación balance energético de una caldera bagacera , el bagazo empleado, tiene un 48 % de humedad, aportando 7892 kJ por cada kg de bagazo húmedo quemado.

El contenido de humedad, también depende del rendimiento de la extracción en el tándem de molinos en trapiche o difusor, para este caso de estudio, el ingenio cuenta con un trapiche de cuatro masas, se obtuvieron datos del análisis de bagazo, donde el contenido de humedad en promedio es 50,07 % y 2,7 % de sacarosa, aportando 7485 kJ / kg.

El contenido de humedad en el bagazo, representa una pérdida considerable de calor, de 1327 kJ, representando el 17,2 %, con respecto a la energía total aportada por el PCI del bagazo. Otro factor que también representa una pérdida tanto para producción de azúcar y para la eficiencia de la caldera, es el contenido de pol en el bagazo, ya que valores por encima del 1.8 %, dificultan la tarea de limpieza de los hornos, para este caso de estudio está considerada como pérdida por radiación y convección, teniendo en cuenta que la caldera tiene hornos tipo herradura de pila.

Para Cardenas, F (2019, p. 44), en el diagnóstico termodinámico para determinar el desempeño energético del generador de vapor, utilizó el método directo para encontrar la eficiencia de la caldera, a partir de la cuantificación de los flujos y entalpías de agua y vapor, como también el flujo de combustible y aporte calorífico.

Concuero con el método empleado, es muy utilizado por especialistas en calderas, para nuestro caso de estudio se encontró el calor total aprovechado, con un flujo másico de vapor de 20 tn/h y con una entalpía de 55041 kJ/kg, a una temperatura de 310 °C y 28 bar de presión de trabajo, entre 82418,76 kJ aportadas por el poder calorífico de 10,74 tn/h de bagazo.

Otra pérdida, es el calor sensible en los gases de combustión, Galvis, C (2018, p. 116), menciona en su investigación que con un exceso de aire del 59 % (1,6), hay una pérdida 7 % en los gases, obteniendo una eficiencia en el generador de vapor del 70,3 %. Para este caso de estudio la segunda pérdida considerable es precisamente en los gases secos con 8,5 %.

Como se muestra en la tabla 13, a menor cantidad de exceso de aire, mayor será la cantidad de CO₂ en los gases de salida, para nuestro caso de estudio se determinó el valor del exceso de aire, siendo 1,52 o 52%, con un 14% de CO₂, en los gases. Esta pérdida de calor, se puede mermar, regulando la compuerta del aire sobre fuego, a tal punto de solo tener un 40 % de exceso de aire, gracias a esto ayudará a una mejor combustión del bagazo.

Por otro lado, se pueden aprovechar los gases de salida, utilizándolos como energía en contacto con un equipo de intercambio de calor, en el caso de esta caldera, solo es aprovechado por un precalentador de aire primario. Se puede implementar un economizador, equipo encargado de elevar la temperatura de ingreso de agua de a caldera, acelerando el proceso de ebullición. Teniendo una temperatura actual de agua condensada de 90°C, con el economizador se pretenderá elevar la temperatura a 145 °C.

Según Mesny (1976,p. XV-3), se estima que por cada 5,5 a 6 °C, que aumenta la temperatura del agua de alimentación en el economizador, la eficiencia de la caldera acuotubular aumenta en 1 %, esta propuesta también está enfocada al ahorro del bagazo como combustible, donde se ahorra en aproximado el 9 % de bagazo del flujo másico de combustible.

Gracias al método indirecto, se determinaron las pérdidas de calor en la caldera No 06, siendo estos: gases secos, con 238 kcal/kg, humedad en el bagazo 317 kcal/kg,

hidrógeno en el bagazo 185 kcal/kg, combustión química incompleta 36 kcal/kg y radiación y convección 32 kcal/kg, haciendo un total de 846 kcal/kg; representado el 43% de la energía aportada por el poder calorífico inferior del bagazo con un contenido del 50 % de humedad.

Por lo tanto, la eficiencia de la caldera por el método indirecto es del 57%, también se calculó mediante el método directo mediante el calor ganado entre el calor aportado, teniendo como resultado 63 %, pero el método más aproximado es el indirecto. Gracias al análisis energético realizado a la Caldera acuotubular No 06 determinar las deficiencias que está presente y las pérdidas de calor que tiene actualmente.

VI. CONCLUSIONES

- Se realizó un diagnóstico a la caldera No 06, para determinar las condiciones actuales de operación, tiene una capacidad de generación de 21 tn/h de vapor sobrecalentado con una temperatura de 310 °C, a una presión nominal de trabajo de 29 kg/cm², tiene la característica de tener tubos curvos, ensamblados a tres domos superiores y uno inferior de lodos. Actualmente la caldera, opera sin economizador, y tiene problemas en su infraestructura refractaria, también presenta problemas en los tubos de agua, por incrustaciones de sólidos.

La caldera No 06, está trabajando 16% menos de su capacidad nominal de generación. En cuanto al tiempo de paradas o fuera de servicio de la caldera por problemas, obtuvo 194 horas el año pasado, siendo la causa principal tubería rota. Se cuantificó el consumo del bagazo como combustible, siendo este de 10.74 tn/h, este cálculo se logró gracias a la energía transmitida al vapor, siendo esta 997,4 kJ/kg. Se realizó el cálculo de la combustión del bagazo con un contenido del 50% de humedad, necesitando 2,8 kg aire por cada kg de bagazo quemado, con un 50% de exceso de aire.

- Para determinar las pérdidas de calor, se calculó el poder calorífico del bagazo, con 2,7% de sacarosa y 50% de humedad, aporta a la combustión 1833,87 kcal/kg. Se cuantificaron las pérdidas de calor, siendo la pérdida de calor más considerable la humedad en el bagazo con 317 kcal/kg, representando el 17,29 % de la energía aportada por el bagazo. Otra pérdida considerable, son los gases secos en la chimenea, con 238 kcal/kg, representando el 8,4 % del PCI del bagazo.
- Utilizando el método indirecto, se determinó la eficiencia de la Caldera, siendo 57%, también se utilizó el método directo, siendo la eficiencia 63%.
- Se presentaron propuestas de mejora para incrementar la eficiencia de la caldera No 06, siendo estas: la reducción del exceso de aire del 50 a 40%, implementar un economizador con la finalidad de incrementar el agua de alimentación de la caldera de 90 °C, utilizando la energía calorífica de los gases

se puede elevar el agua hasta 160 °C, logrando ahorrar 27.92 tn/d de bagazo, lo que representa un ingreso económico de S/161,118.72 anuales.

- Dadas las propuestas de mejora se logró reducir las pérdidas de calor en la caldera, aumentando la eficiencia de la caldera a 72%, con un consumo de bagazo de 9.4 tn/h.

VII. RECOMENDACIONES

- Según el análisis realizado a la caldera No 06, existe constantes paradas por tubería rota, producto de de las incrustaciones y sólidos existentes en el agua de alimentación, ante este problema se recomienda las siguientes acciones:

Tener un tiempo de operación no mayor a 30 días, en el mantenimiento programado se deberá de realizar un sondeo de toda la tubería, mediante agua a una presión de 15 bar, para remover la mayor cantidad de incrustaciones.

Implementar una planta de tratamiento de agua, para tratar el agua que se utiliza cuando no hay condensados. También se puede instalar un desaireador, con la finalidad de quitar el oxígeno del agua, evitando al corrosión de la tubería.

Cambiar la tubería que está en mal estado, que previamente ya se ha identificado en el sondeo.

- Realizar un plan de mantenimiento integral para la caldera No 06, este plan deberá ejecutarse en una parada prolongada de más de un mes, que sería en la parada anual. También realizar una guía de operación y capacitación continua en temas de calderas y generación de vapor, sería de gran ayuda a los operadores.
- Implementar equipos de protección personal EPP, a los operarios y personal técnico involucrado en la reparación de calderas.
- Instalar instrumentos de medición, en lugares y equipos estratégicos de la caldera, donde se pueda medir la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, temperatura del aire precalentado, presión de los gases de salida. También instalar caudalímetros, para medir el caudal volumétrico del vapor que genera la caldera.
- Colocar material asilante, en la línea de agua de alimentación, aplicar material refractario a las zonas de alta transferencia de calor, como: hogares, puertas de hornos, bafles, cortinas direccionales, domos.

- Implementar sopladores de hollín, para limpiar incrustaciones en la superficie de los tubos.

REFERENCIAS

- Hugot E. (1972). *Manual para Ingenieros Azucareros*. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V.
- Muñoz. M. (2015). *Guía para determinar pérdidas en un caldera*. Impreso en Argentina.
- Alderetes C. (2016). *Calderas a Bagazo – Proyecto, Operación y Mantenimiento*. Impreso en Argentina.
- Cengel, Y., & Boles, M. 2014. *Termodinámica*. Mexico : Mc Graw Hill octava edicion, 2014. ISBN 978-0-07-352932-5.
- Payner. H. (1991). *Cogeneration in the cane sugar industry*. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V. ISBN: 0444888268
- BONILLA, J.[et al.]. (2011). *Termodinámica de Equipos Industriales: Eficiencia Energética de una Caldera*. (Tesis de grado)
- 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.

- Kohan, A. (2017). Sistemas de recipientes a presión. Nueva York: Editorial Mc Graw Hill.
- Jaiswal, Kush. 2015. Study about efficiency improvement of thermal power plant&advance technologies in different types of plants. India : s.n.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. 2014. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology.
- Siquiná, G. (2008). Análisis termodinámico para el mejoramiento de la eficiencia de operación de la caldera del ingenio Tulumá (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_secu

ndario_caliente_en_calderas_de_vapor_bagaceras_y_su_influencia_en_el_re
ndimiento_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>
- Vilca, L., & Llanque, F. (2015). Implementación y evaluación de un generador de vapor tipo vertical de dos pasos para uso de laboratorio y ensayos de producción. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Altiplano.

- Suarez, A (2010). Metodología para la obtención de los índices de consumo y la explotación más eficiente en el generador de vapor de la Universidad. Matanzas. (Trabajo de diploma s.n.)
- Barboza, A. (2015). Auditoria Energética de la Empresa Agroindustrial Tumán. (Tesis de grado, Universidad Pedro Ruiz Gallo). (Acceso el 12 de enero del 2020).
- Prieto, E. (2017). Aumento de la eficiencia energética en las calderas mediante la recirculación de condensados en la Industria Gloria Colombia Planta Cogua. (Tesis de grado).
- Laca, S. (2020). Diseño y balance energético de una caldera bagacera para producción de panela mediante tecnología de vapor.
- 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.
- BEHN, Arnulfo. Tratamiento de aguas para calderas [en línea]. 2002 [fecha de consulta: 04 de febrero del 2020]. Disponible en

http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo_tratamiento_de_agua_en_calderas

- El almacenamiento de bagazo para la industria de derivados por Rafael Zuares [et al.] Editorial Científico – Técnica, 1982. 80 pp.
- FERNÁNDEZ, Pedro. Centrales térmicas [en línea]. 2008 [fecha de consulta: 06 de febrero del 2020]. Disponible en <http://libros.redsauce.net/>
- KOHAN, Anthony. Manual de Calderas. Volumen I. Mc Graw Hill. Impreso en España, 2000. 420 pp. ISBN: 84-481-2801-X
- SANZ, Manuel y PATIÑO, Rosario. Manual del operador de calderas industriales. Editorial Paraninfo. Impreso en España, 2014. 352 pp. ISBN: 978-84-283-3435-8
- BORROTO, Aníbal y RUBIO, Ángel. Combustión y generación de vapor. Editorial Félix Varela. Impreso en La Habana Cuba, 2009. 80 pp. ISBN: 959-07-425-610-4

ANEXOS

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>Análisis de la Caldera acuotubular No 06</p>	<p>El análisis a la caldera, se basa en un diagnóstico integral de la misma, con el objetivo de determinar el rendimiento actual del generador de vapor y cuantificar sus pérdidas de energía, en el sistema de congeneración.</p>	<p>Analizar el comportamiento de la caldera en operación, determinando parámetros y variables, como consumo de bagazo, cantidad de gases, aire comburente.</p>	<p>Diagnostico integral</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>Reducir pérdidas de energía.</p>	<p>Las pérdidas de calor, en los generadores de vapor, se ve reflejada en los gases de escape, en las incrustaciones en los tubos, en las purgas, por combustión incompleta.</p>	<p>Estas pérdidas, determinan la eficiencia actual de la caldera, suelen darse por falta de mantenimiento, o deficiencia en el sistema de generación.</p>	<p>Pérdidas de calor</p> <p>Rendimiento de la Caldera</p>	<p>Exceso de aire.</p> <p>Gasto combustible.</p> <p>Baja producción de vapor</p>	<p>Razón</p>

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Validación de los instrumentos.

FICHA DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS GENERALES DEL EXPERTO

Apellidos y Nombres:

Odar Pacherez David

Profesión:

Ingeniero

Grado Académico:

Ingeniero Mecánico Electricista

Actividad laboral actual:

Ingeniero Integral
Agroindustrial Pomalca

Mediante la matriz de evaluación, Ud. tiene la facultad de evaluar cada una de las preguntas marcando con una X en las columnas de relevancia.

Donde:

MUY DEFICIENTE	DEFICIENTE	ACEPTABLE	BUENA	EXCELENTE
1	2	3	4	5


DAVID ODAR PACHERREZ
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
REG. CIP 244884

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
Claridad	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales				X	
Objetividad	Las instrucciones y los ítems del instrumento permiten recoger la información objetiva sobre las variables.					X
Actualidad	El instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovador y legal a las variables.					X
Organización	Los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respecto a las variables.					X
Suficiencia	Los ítems del instrumento son suficiente en cantidad y calidad acorde con la variable, dimensiones e indicadores.				X	
Intencionalidad	Los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos, hipótesis y variable.				X	
Consistencia	La información que se recoja a través de los ítems del instrumento, permitirá analizar, describir la investigación.					X
Coherencia	Los ítems del instrumento expresan relación con los indicadores de cada dimensión de las variables.				X	
Metodología	La relación entre la técnica y el instrumento propuesto responden al propósito y desarrollo de la investigación.				X	
Pertinencia	La redacción de los ítems concuerda con la escala valoradora del instrumento.				X	


DAVID ODAR PACHÉREZ
 INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
 REC. CIP 24488*

Tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 "EXCELENTE", sin embargo; un puntaje menor al anterior se considera al instrumento no válido, ni aplicable.

PROMEDIO DE VALORACIÓN	44
------------------------	----

¿Qué observaciones y/o sugerencias haría Ud. para mejorar el instrumento de recolección de datos?

Mencionar que técnicas e instrumentos de recolección de datos empleará. Por otro lado asegurarse que los instrumentos de medición estén debidamente calibrados, para obtener valores confiables.

Le agradecemos por su colaboración en este proyecto de investigación.

Fecha de evaluación 05/09/21


DAVID ODAR PACHÉREZ
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
REG CIP 244881

Anexo 4. Detalle de los costos de la implementación de un economizador.

INVERSIÓN DEL PROYECTO - MATERIALES				
MATERIALES	CANT	UNIDAD	PRECIO UNIT	TOTAL
Tubo de acero 2" x 24"x 4.19 mm ASTM - A 192	287	Pieza	237.42	68,139.54
Tubo de acero 10" x 91"x 12.7 mm ASTM - A 106	2	Pieza	1,470.00	2,940.00
Platina de acero 3/8" x 3" x 6 m ASTM - 36	8	Pieza	122.03	976.24
Válvula 3" CLASE 600	2	Pieza	750.00	1,500.00
Válvula 1" CLASE 601	1	Pieza	220.00	220.00
Tubo 3" Schedule 40	2	Pieza	350.00	700.00
Tubo 1" Schedule 41	1	Pieza	150.00	150.00
Empaquetadura espiro metálica 3" CLASE 600	2	Pieza	40	80
Soldadura cellorcord 6011 - 1/8"	44	kg	12.55	552.20
Soldadura supercito 7018 - 1/8"	44	kg	250.00	11,000.00
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	8	m ³	10.00	80.00
Oxigeno	12	m ³	10.00	120.00
Pernos G8 3/4"x4"	16	Pieza	8.00	128.00
TOTAL				S/86,957.98

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
TOTAL				S/6,800.00

INVERSIÓN DEL PROYECTO - MANO DE OBRA CONFECCIÓN				
PERSONAL	CANT	DÍAS	PRECIO / DIA	TOTAL
Ingeniería supervisión	1	20	250.00	5,000.00
Soldador	2	20	120.00	4,800.00
Armador	1	20	80.00	1,600.00
Biselador	1	20	60.00	1,200.00
Oficial	1	20	50.00	1,000.00
TOTAL				S/13,600.00

INVERSIÓN DEL PROYECTO - MANO DE OBRA MONTAJE				
PERSONAL	CANT	DÍAS	PRECIO / DIA	TOTAL
Supervisor	1	3	150.00	450.00
Soldador	2	3	120.00	720.00
Armador	1	3	80.00	240.00
Mecánico	1	1	60.00	60.00
Oficial	1	3	50.00	150.00
Tecla 1 tn	2	3	40.00	240.00
Máquina de soldar	2	3	100.00	600.00
TOTAL				S/2,460.00

COSTO DE LA INVERSIÓN PROYECTO ECONOMIZADOR	
Costo de materiales para confección del economizador	S/. 86,957.00
Costo de alquiler de equipos para la confección del economizador	S/. 6,800.00
Costo de la mano de obra para la confección del economizador	S/. 13,600.00
Costo de la mano de obra para el montaje del economizador	S/. 2,460.00
Costo Total	S/. 109,817.00

CALDERA CON ECONOMIZADOR	TN/H	TN/D (23 HR EFECTIVAS)	PRECIO TN BAGAZO	AHORRO DIA (S/)	AHORRO MES (S/)	AHORRO AÑO (S/)
Ahorro de bagazo	1.332	27.972	S/20.00	S/559.44	S/13,426.56	S/161,118.72
INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO (S/)						S/109,817.00
TIEMPO DE RETORNO DE LA INVERSIÓN (MESES)						8.18

Anexo 5. Tablas termodinámicas de vapor de agua

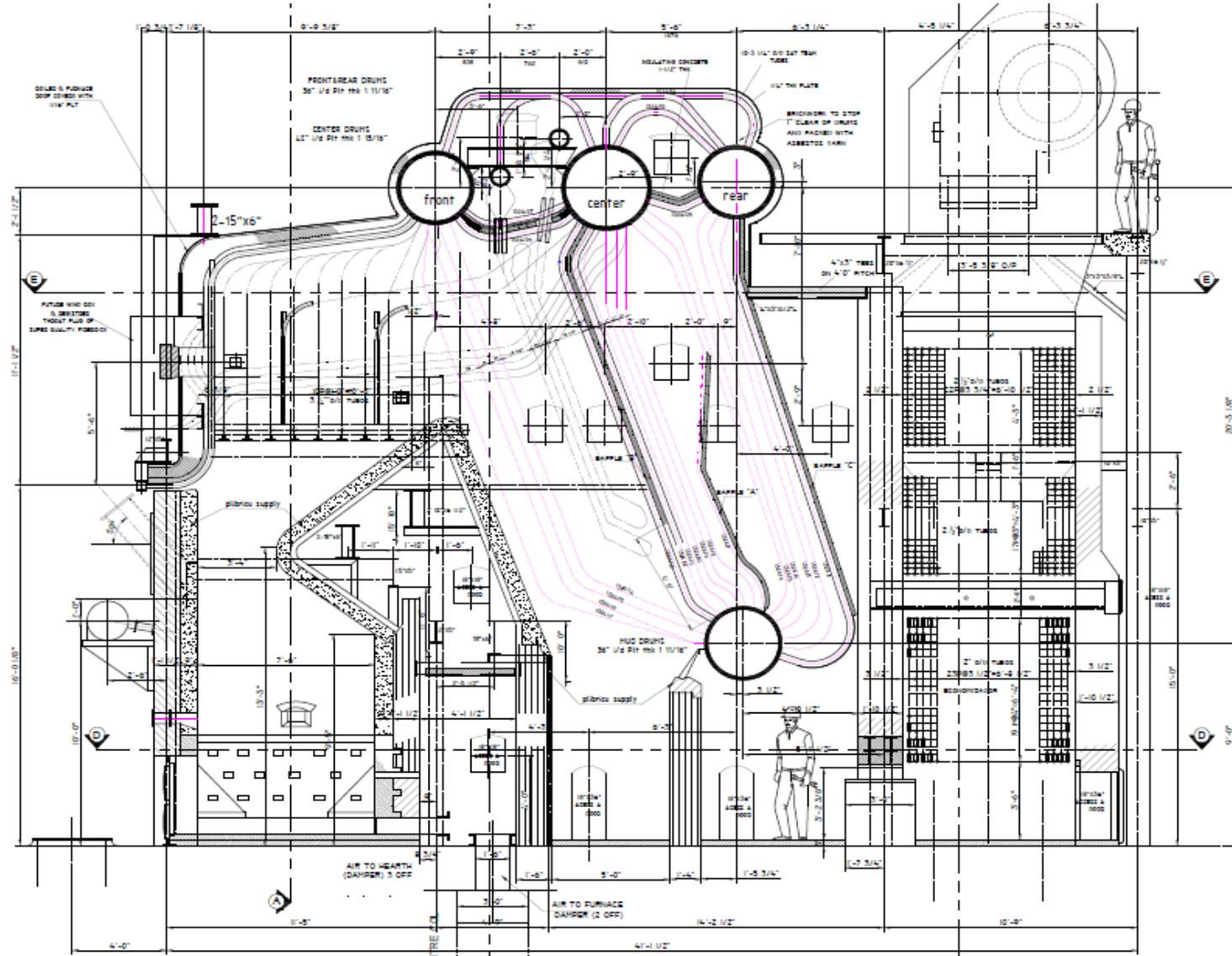
Vapor de agua sobrecalentado													
<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg
<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*				<i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)				<i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°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	
<i>P</i> = 0.20 MPa (120.21°C)				<i>P</i> = 0.30 MPa (133.52°C)				<i>P</i> = 0.40 MPa (143.61°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	
<i>P</i> = 0.50 MPa (151.83°C)				<i>P</i> = 0.60 MPa (158.83°C)				<i>P</i> = 0.80 MPa (170.41°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	

Propiedades físicas de los gases de combustión							
(B=1.01 x 10 ⁵ Pa; ρ_{CO_2} = 0.13; ρ_{H_2O} =0.11; ρ_{N_2} =0.76)							
t °C	ρ kg/m ³	Cp kJ/kg °C	$\lambda \times 10^2$ W/(m °C)	a x 10 ⁶ m ² /s	$\mu \times 10^5$ Pa.s	v x 10 ⁵ m ² /s	Pr
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

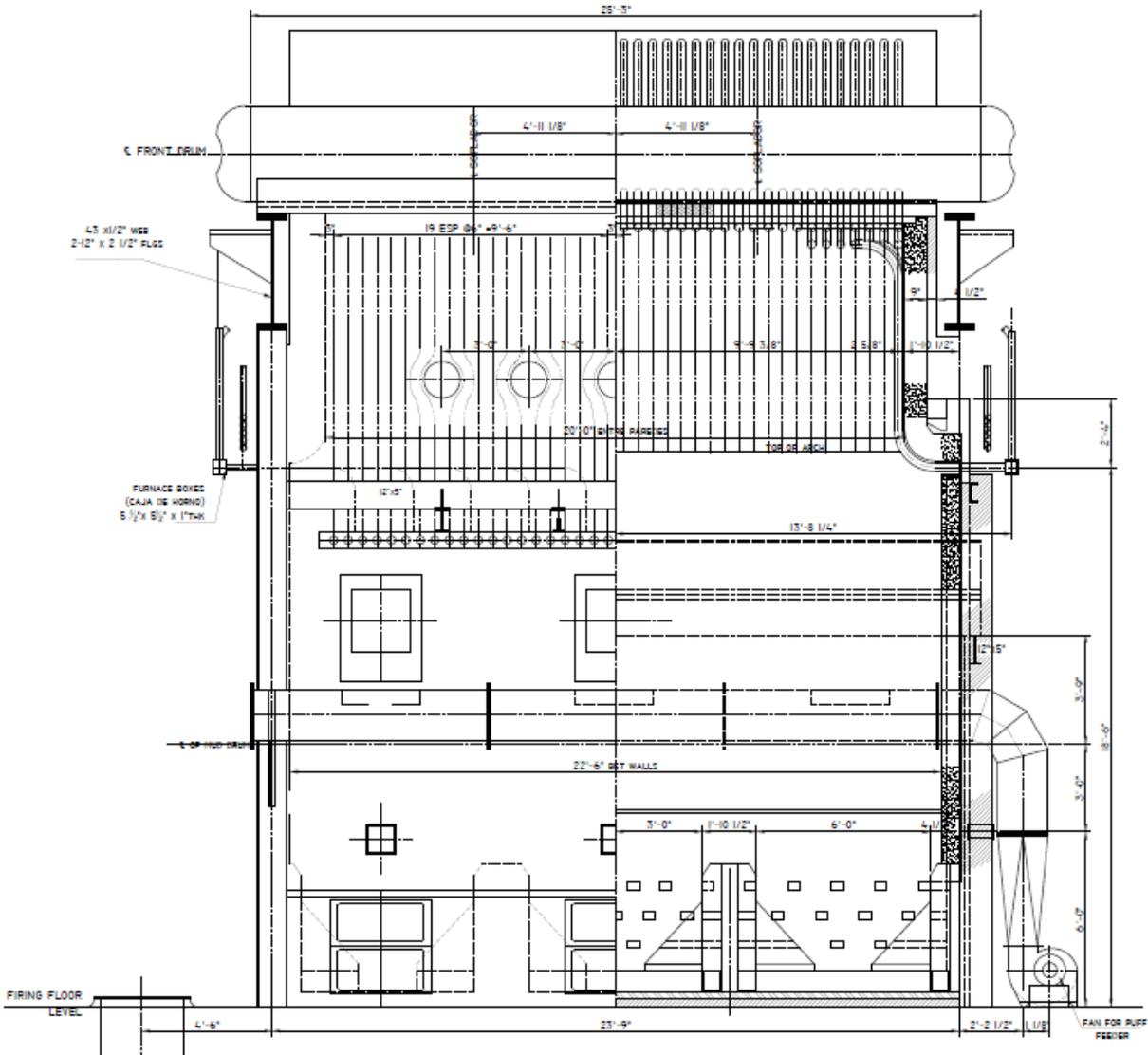
Agua saturada. Tabla de temperaturas

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	9.1556	9.1556
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

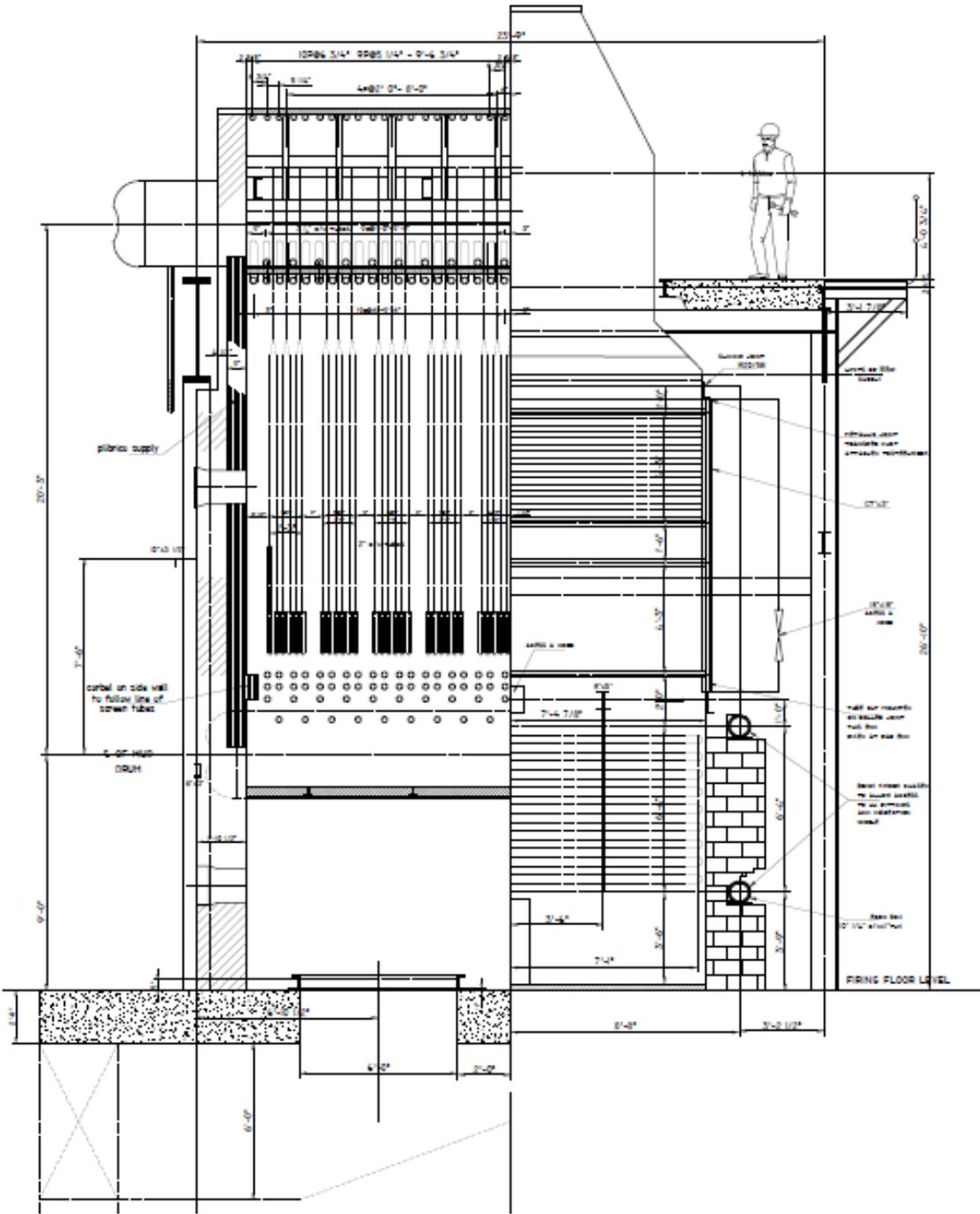
Anexo 6. Plano vista lateral – Caldera No 06



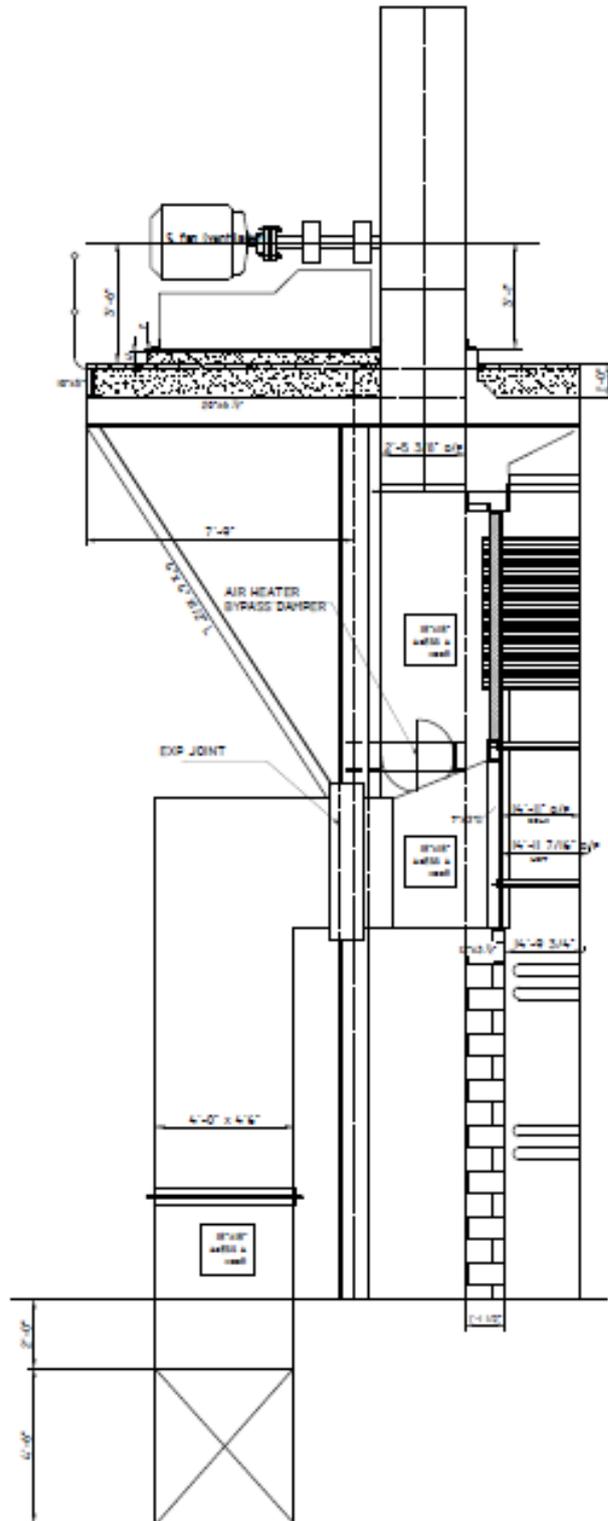
Plano vista frontal – Caldera No 06



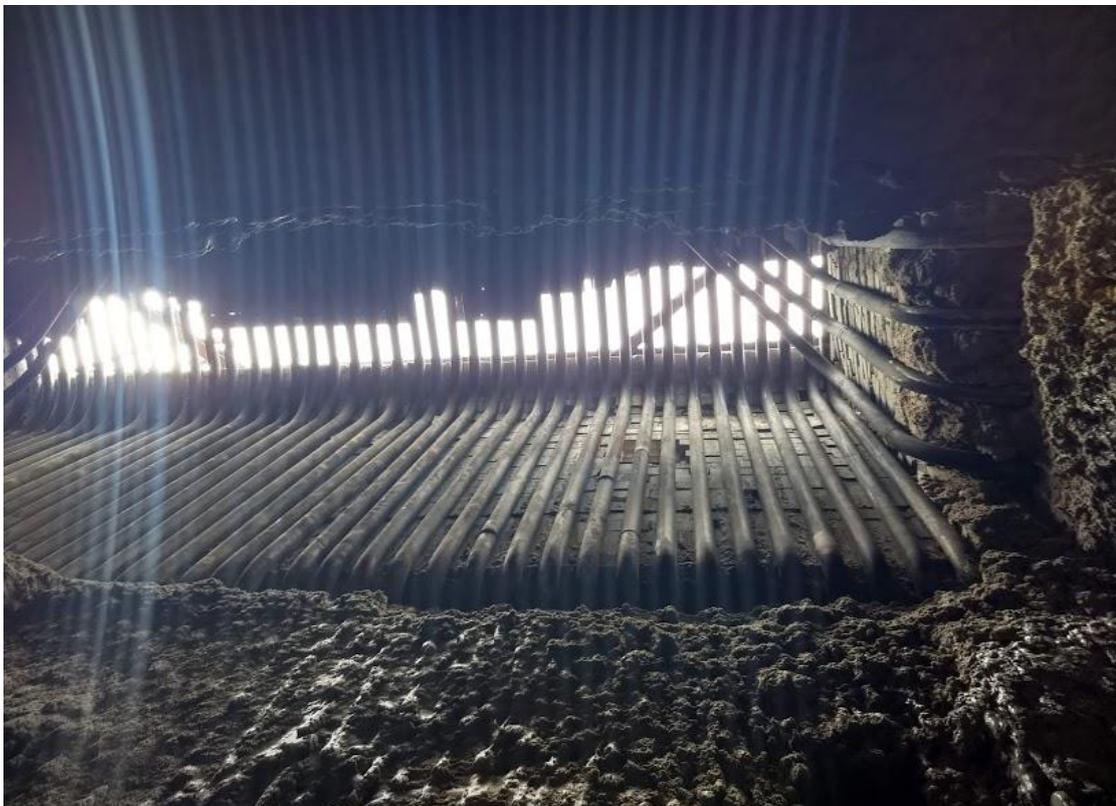
Plano vista posterior interior



Plano vista lateral – Tiro Forzado



Anexo 7. Fotografía Caldera No 06





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:

“ANÁLISIS, PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LA CALDERA ACUOTUBULAR NO 06, EN AGROINDUSTRIAL POMALCA”

Del autor **TORRES VILLALOBOS JAVIER EDUARDO**, 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, 13 de junio del 2022

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