



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

“Propuesta de mejora de caldera NR.20 en base a auditoría energética para reducir el costo en la generación de vapor en Agroindustrial Cartavio SAA”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Mecánico Electricista

**AUTORES:**

Guevara Ramos, Marvin Ricardo (ORCID: 0000-0001-5711-7574)

Valverde Ramos, Leonell (ORCID: 0000-0002-0243-5505)

**ASESOR:**

Mg. Paredes Rosario, Raúl Rosalí (ORCID: 0000-0002-3032-3527)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación y Distribución de Energía

TRUJILLO – PERÚ

2020

## **Dedicatoria**

Se la dedicamos al creador de nuestras vidas, a nuestro padre celestial. El que nos guía y acompaña siempre día a día, encaminándonos al éxito. Con nuestro más sincero respeto y amor al dueño de todas las cosas de esta vida.

## **Agradecimiento**

Agradecemos a la vida, por darnos la oportunidad y la dicha de poner a las personas indicadas, en todas las etapas vividas. A nuestros padres, a nuestras familias y en especial a nuestros hijos; por darnos las fuerzas, empuje y las ganas de terminar la carrera profesional.

Agradecemos a la universidad, a la plana docente y a todos los compañeros; que juntos nos encaminamos en la apasionante misión de aprender materias y forjar valores de bien.

Finalmente Agradecer a nuestros Asesores de tesis; Mg. Paredes Rosario, Raúl Rosalí y a la Dra. Armas Alvarado, María Elisia por sus discernimientos y orientación, en el engrandecimiento de la tesis.

## Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento .....	iii
Página del Jurado.....	iv
Declaración de Autenticidad .....	vi
Índice .....	vii
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras .....	ix
<b>RESUMEN</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Realidad Problemática .....	2
1.2. Trabajos previos.....	3
1.3. Teorías relacionadas al tema.....	11
1.4. Formulación del problema .....	21
1.5. Justificación del estudio.....	21
1.6. Hipótesis .....	21
1.7. Objetivos.....	21
<b>II. MÉTODO</b> .....	23
2.1. Tipo y diseño de investigación .....	24
2.2. Operacionalización de variables. ....	26
2.3. Población, muestra y muestreo. ....	27
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.....	27
2.5. Procedimiento .....	28
2.6. Métodos de análisis de datos.....	29
2.7. Aspectos éticos .....	29
<b>III. RESULTADOS</b> .....	30
3.1. Auditoría energética en caldera .....	31
3.2. Preparar una propuesta técnico económica de mejora en caldera Nro. 20. ....	43
3.3. Análisis económico de la mejora energética.....	45

<b>IV. DISCUSIÓN</b> .....	51
<b>V.CONCLUSIONES</b> .....	56
<b>VI. RECOMENDACIONES</b> .....	60
<b>. REFERENCIAS</b> .....	62
<b>ANEXOS</b> .....	65

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Operacionalización de variables .....	27
<b>Tabla 2:</b> Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad .....	28
<b>Tabla 3:</b> Composición química del bagazo .....	48

## Índice de Figuras

<b>FIGURA 1:</b> Pasos del diseño de investigación .....	25
<b>FIGURA 2:</b> Balance de energía de caldera N° 20. elaboración propia .....	34
<b>FIGURA 3:</b> Esquema de purga de fondo en caldera N° 20. Elaboración propia .....	38
<b>FIGURA 4:</b> Diagrama de Sankey de energía para la caldera N°20 de Cartavio SAA. <b>Elaboración propia</b> .....	40

## RESUMEN

Se presenta la elaboración de una propuesta de mejora de una caldera de vapor sobrecalentado, para disminuir los precios de generación de vapor.

Se llevó a cabo una auditoría energética en la caldera y se determinó la capacidad actual de generación de vapor, siendo de 105 Ton/h, también el rendimiento actual de caldera, siendo de 64.20%; el consumo actual de combustible en caldera, de 52.68 Ton bagazo/h y el precio actual de generación de vapor, de 30.61 soles/Ton.

A continuación se preparó una propuesta técnico económica de mejora en caldera Nro. 20, estableciendo la capacidad proyectada de generación de vapor, de 120 Ton/h, el rendimiento térmico proyectada de caldera, de 73.67 %, el consumo de combustible proyectado en caldera, de 44.616 ton bagazo/h; y el precio proyectado de generación de vapor, de 25.92 soles/Ton.

Se realizó un análisis económico de la mejora energética. Se estableció el presupuesto de inversión, ascendiente a 660,655 soles, se determinó el beneficio neto, de 3'588,998 soles/año y el tiempo de retorno de la inversión, 2.2 meses.

En la parte final del desarrollo se hizo el análisis de impacto medio ambiental de la mejora energética, del análisis de combustión se establece la reducción de gases contaminantes, del orden de 13599 kg/h de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

**Palabras claves:** Auditoría energética, análisis medio ambiental, eficiencia de caldera, costo unitario.

## **ABSTRACT**

The proposal for the improvement of an overheated steam boiler is presented to reduce steam generation costs.

An energy audit was carried out in the boiler and the current steam generation capacity was determined, being 105 Ton / h, also the current boiler efficiency, being 64.20%; the current fuel consumption in the boiler, of 52.68 Ton bagasse / h and the current cost of steam generation, of 30.61 soles / Ton.

Next, an economic technical proposal for improvement in boiler No. 20 was prepared, establishing the projected steam generation capacity of 120 Ton / h, the projected thermal efficiency of the boiler, of 73.67%, the projected fuel consumption in the boiler, of 44,616 ton / h; and the projected cost of steam generation, of 25.92 soles / Ton.

An economic analysis of the energy improvement was carried out. The investment budget, amounting to 660,655 soles, was established, the net profit of 3,588,998 soles / year was determined and the period of return of the investment was 2.2 months.

In the final part of the development the environmental impact analysis of the energy improvement was made, the combustion analysis establishes the reduction of polluting gases, of the order of 13599 kg / h of CO<sub>2</sub> into the atmosphere.

**Keywords:** Energy audit, environmental analysis, boiler efficiency, unit cost.



## **I. INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Realidad Problemática.

En los ingenios azucareros peruanos, el agente térmico principal es el vapor de agua, en dos estados muy importantes, en sobrecalentamiento, generado en calderas acuotubulares, aprovechando el calor de la combustión de la biomasa y otro combustible, si es mezcla de ellos, este vapor sirve para generar energía eléctrica en los turbogeneradores de Planta de Fuerza y vapor saturado, luego de ser tratado al salir de los turbogeneradores y ser enviado a Fábrica de azúcar/alcohol para aprovechar su calor latente de condensación (Azañero – Contreras, 2011).

La generación de vapor es un proceso complejo, es isobárico, a media o alta presión y temperaturas que alcanzan los 850°C en el hogar y hasta los 485 °C en el vapor. Necesita un tratamiento del agua que es caro, pues el agua de la costa peruana es muy dura, con más de 650 ppm que la califica como muy dura, tiene tratamiento de ablandamiento, desaireación térmica para asegurar la correcta operación y eficiencia en la transferencia de calor, ver figura nro. 1 y la duración adecuada de los componentes de la caldera. (Pérez – Haro, 2013).

El costo de generación del vapor en estas calderas, se sitúa entre los 80 a 90 soles por tonelada métrica, dependiendo del costo de combustible, eficiencia de la caldera, costo de mantenimiento, de operación, entre otros componentes de costo. La planta térmica de Cartavio, es una industria empleada a la producción de azúcar de caña y alcohol, con una capacidad de procesamiento de caña de 5000 toneladas de caña por día, y de alcohol de 60,000 litros por día, cuenta con dos calderas la N°20 y la N°. 17; del tipo acuotubular, la caldera motivo de la presente investigación es la N° 20; marca Caldema, fabricada en Brasil, con Disposición de generación de vapor: 120,000 kg/h; presión del vapor generado de 42 bar, Temperatura del vapor generado de 420 °C, quema como combustible, bagazo de caña de azúcar, utiliza agua de alimentación a 105°C, con área de intercambio de calor radiante: 408 m<sup>2</sup>, área de intercambio de calor convectiva: 2102 m<sup>2</sup>, rendimiento térmico: 62 a 65 %, costo actual de generación de vapor: 110 a 116 soles/Ton métrica. Esta es la caldera base, opera todo el tiempo de procesamiento de caña y azúcar. Se le da mantenimiento preventivo durante 20 a 25 días por año, y luego un día cada quince días, en promedio, en el resto, se le da mantenimiento correctivo debido a las fallas ocasionadas por la mala calidad del combustible y los fenómenos de desgaste con los que trabaja: Corrosión, abrasión, erosión a alta temperatura y esfuerzos térmicos por la fluencia térmica, por trabajar a presiones altas y temperaturas que producen la rotura de tubos y baja eficiencia en la caldera, encareciendo

el precio de generación de vapor. (Cartavio – 2019).

La caldera N° 20 tiene un sistema de automatización parcial, con Scada en pantalla para PC, pero no se miden todos los parámetros, de tal modo que no se aplica un sistema de monitoreo que permita tomar medidas para el aumento de la continuidad operacional y de la eficiencia térmica con la consecuente disminución de precios de generación de vapor.

Se plantea, de acuerdo a lo presentado, aplicar una auditoría energética a la caldera N° 20 y determinar su capacidad real, rendimiento y el costo con mayor precisión, establecer un programa de gestión energética, para mejorar sus indicadores y reducir el costo de producción de vapor, el cual, según planta, es de 110 a 116 soles/ton, lo que es caro en la industria azucarera. Este programa contendrá un plan de mejora de los parámetros y la aprobación de la Gerencia de Planta, así como el involucramiento de los subsistemas que atienden a la caldera: tratamiento de agua, suministro de combustible, y los turbogeneradores de energía eléctrica, sistema de producción fabril, el programa deberá asegurar la sostenibilidad de la mejora de la gestión de producción de vapor en Cartavio, para ser más competitivo. (Fuente Propia Cartavio SAA).

## **1.2.Trabajos previos.**

Azañero – Contreras, (2011) Mediante los análisis de laboratorio se determinó las propiedades de la cosecha en verde tales como el PCI: 15206.47 Kj/Kg, Humedad: 19% (4to día de Corte), determinando la masa de energía de los restantes de la cosecha en verde a 24.6 Ton/hr a una humedad de 19%, según los resultados de la masa energética se considera que la mezcla aceptable para la combustión es de 82% de residuos y de 18% de bagazo. En el análisis económico se determinó los gastos totales de inversión de 2'188,646.19 nuevos soles con una remuneración anual de 2,889,926.5 nuevos soles durante 10 años, la cual tiene un tiempo de retorno de 9 meses, reporta que la preparación o picado de los residuos es variable importante, pues la llegada de trozos largos afecta el normal funcionamiento de los sistemas corrientes de alimentación de bagazo de la caldera, concluye que es importante según estudios, que los residuos lleguen con una humedad máxima de 30 %, de tal forma que no incida sobre las condiciones de combustión y no pierda su valor como combustible, también concluye que los factores de mayor influencia en la disminución de la temperatura de combustión son: El tiempo de combustión (depende de la naturaleza fisicoquímica del combustible), El exceso de aire y la Eficiencia del Mezclado.

Los autores recomiendan realizar estudios para caracterizar la recolección, transporte, manejo y factibilidad de aprovechamiento de residuos de cosecha de caña en calderas en porcentaje mayores y contabilizar tiempos, recursos y costos, señalan que aspectos como el equipo y las disposiciones requeridas y el efecto de los residuos y sus cenizas en las calderas deberán ser identificados para llegar a determinar la viabilidad de este sistema de manejo de residuos y su eficiencia frente a otros sistemas, también sugieren que para el porcentaje de humedad de los restantes de la cosecha en verde de la planta de caña de azúcar sea entre un rango de 20% (4to día de corte) y 45% (2do día de corte) así, las propiedades físico químicas estarán en las mejores condiciones para la combustión. Afirman que, con el Ahorro que se obtendría con la venta de bagazo, sería prudente realizar investigaciones para optimizar el procedimiento de preparación de los residuos, así como la implementación de equipos más sofisticados.

Gálvez – Vidaurre, (2010) en su trabajo de investigación sobre la utilización del desincrustante magnético (DM) para optimizar la calidad del agua en calderas, con la utilización del desincrustante magnético (DM) se logran reducir las incrustaciones calcáreas o deposiciones que se producen en cualquier tubería de calderas o equipo industrial apareciendo los problemas de agua dura, extendiendo la vida ideal de los implementos, optimizando la solubilidad de las sales, primordialmente de carbonato cálcico, además, con la utilización del DM se notaron cambios en los valores de pH, de la conductividad eléctrica y tensión superficial del agua, realizándola “más húmeda”, donde se economizaría significativamente la utilización de productos químicos para el método del tratado del agua. Cárdenas – Gerónimo, (2006) en la publicación de su artículo científico sobre Probabilidades del secado de bagazo en los ingenios azucareros de México, indican que, del estudio de las propiedades de la planta generadora de vapor de cada empresa en el ingenio azucarero mexicano, se estableció los parámetros de trabajo de una caldera bagacera tipo, antigua, con generación de vapor de 46 t/h a 17.64 kg/cm<sup>2</sup> y 284.5°C, combustión del bagazo de una humedad promedio del 51.15%.

Afirman los autores que, de los balances de masa y energía se logró un incremento energético del proceso de 55.1% y un índice de generación (ig) de 1.59 kg vapor/kg bagazo. La conclusión de los balances de masa y energía para el Esquema Caldera +ICQ +Secadero de bagazo evidenciaron que desviando al secadero un 42% de los gases restantes del horno a 300°C, se logró presecar el bagazo inicial desde 51.15% de humedad hasta 40.75%, teniendo la relación másica Gases/Bagazo a secar de 2.35.

Según los autores de la investigación, incorporando un secador de bagazo permitieron optimizar la combustión, al tener un combustible con bajo índice de humedad, obteniéndose beneficios del 68,9%, mayor en 13,8 puntos respectivamente al rendimiento de la caldera original. Se nota un incremento relativo del índice de producción del 25%, el excedente neto de bagazo alcanza a 5133 kg/h, que, usando una conversión isocalórica con el combustóleo, equivale a 734 kg/h de ese combustible, presumiendo que su PCI es de 9599 kcal/kg.

Según Cárdenas y Gerónimo, se demuestra la viabilidad técnico-económica de incorporar un secadero de bagazo a calderas bagaceras antiguas, y que resultarían comunes en los ingenios azucareros mejicanos.

Bosch - Ruiz, (2005) los investigadores publicaron un artículo científico sobre el Estudio teórico de las calderas bagaceras retal cv-45-18, donde se desempeñan con petróleo cubano emulsionado, informan que la eficiencia de la caldera quemando combustible emulsionado (89 % como promedio) es mayor en comparación con el bagazo (79 %), y esto se debe a la intensificación de la transferencia de calor y a un mayor aprovechamiento de la energía total disponible.

Según los autores, la temperatura adiabática en el horno alcanza valores por encima de lo permisible, desde 1 772.5 °C para 10 % de emulsión hasta 1 490.4 °C con 50 %. Para estas calderas, la temperatura de trabajo se encuentra en el orden de los 1 200 a 1 300 °C. La temperatura de los gases al final del horno, entre 1 103.9 °C para 10 % de emulsión y 1 052,3 °C con 50 %, se encuentra por debajo de la temperatura de fusión de la ceniza para este tipo de combustible (1 200 °C), por cuanto se puede pronosticar que la superficie convectiva no recibirá sedimentos como consecuencia de la fusión de la ceniza.

Señalan los investigadores, la baja velocidad de los gases en la caldera provoca una disminución de la temperatura del vapor sobrecalentado desde 320 a 285 °C. Este hecho también se debe a la baja formación de gases comparado con la quema de bagazo, y la principal dificultad a que esto conlleva, está relacionada con la disminución de la potencia eléctrica que se debe generar.

Ellos concluyen que la temperatura de rocío de los vapores de ácido sulfúrico (de 259 a 278 °C) es superior a la temperatura de los gases de escape (200 °C), lo que evidencia la condensación de estos ácidos sobre la superficie del calentador de aire, por lo que presenta la corrosión de la caldera para las condiciones de operación analizadas.

Cruz - Colombres, (2013) en su investigación científico sobre aumento en la eficiencia de calderas bagaceras de presiones altas, informan que el análisis teórico previos de los primeros casos planteados en esta investigación demostró que la inclusión de un secador lograría optimizar el funcionamiento de las calderas bagaceras de alta presión. En el estudio 1, se obtendría un alto ahorro de bagazo, generando un bajo precio en equipos, por usarse un bajo caudal de gases.

Los autores señalan que, con la desviación al secador del 26,80% de los gases de combustión previos que lleguen al economizador, se lograría un ahorro de combustible del 10,07%, es decir 26.783 toneladas de bagazo por zafra; equivalente a 1,792.870 USD/zafra, reflejados en precios de gas natural.

Según los autores, en lo que compete al estudio 2, utilizando el total de los gases para presecar el bagazo, se lograría un ahorro de combustible del 7,51%, por lo tanto 19.979 t de bagazo por zafra, equivale a 1.337.372 USD/zafra, reflejados como precio de gas natural equivalente. Lográndose deducir un alto sobrante de energía eléctrica apta para venta a la red, donde incrementaría las ganancias financieras. También, el uso de los secadores de bagazo se obtiene beneficios ambientales, dado que estos reducen las emisiones de gases y de material particulado.

Los autores señalan que, utilizando el estudio 1, se ahorraría más bagazo con un bajo precio de equipos, por el uso de un bajo caudal de gases. No obstante, el estudio 2 es de igual modo provechoso y se aplicaría en aquellas circunstancias donde, por dependencia de espacio en planta, es dificultoso utilizar el estudio 1.

Pérez - Haro, (2012) investigan sobre el impacto del flujo de aire-combustible en la eficiencia y economía de una caldera bagacera mediante un sistema de proceso de la combustión, reporta que el aire requerido para una buena combustión se determina en un valor óptimo de 6,822 kg. de aire / kg. de bagazo, siendo el estequiométrico 5,73 kg. de aire / kg. de bagazo que permitirá obtener una mayor eficiencia en la caldera, superior al 75%, si consideramos que el exceso de aire empleado actualmente excede en 0,698 kg. de aire / kg. de bagazo al valor óptimo esto produce un incremento en el flujo de gases a la salida de la chimenea en un 9,28%.

Los autores sostienen que, empleando un sistema de control automático de tipo proporcional que mantenga constante el parámetro aire combustible se obtiene una eficiencia de 75% durante toda su operación manteniendo una proporción aire combustible de 7,52 kg. de aire / kg. de bagazo. También indican que el parámetro aire/combustible se mantiene

constante mediante el empleo de un sistema de control automático tipo proporcional y de lógica cableada; dicho sistema efectúa el control mediante la obturación automática de la boca de succión del ventilador centrífugo de acuerdo al flujo de bagazo teniendo en cuenta su variabilidad.

Los autores señalan que, el sistema de control está compuesto de un panel de control y comando, actuador (cilindro neumático-válvula proporcional) sistema de pesada (alimentador de bagazo) con sensor de tipo pulsos de 4-20 mA. Mediante la implementación del sistema de control proporcional para mantener constante el parámetro aire – combustible se tiene un ahorro de 1,346 TM/h y considerando que el costo del bagazo es de \$30/TM. Se obtiene una economía en combustible de \$241 080/año para una caldera de tipo acuotubular bagacera.

Rodas – Machuca, (2009) en la investigación que realizaron sobre Estudio colacionado de la eficiencia térmica en la caldera bagacera, reportan que, a través de la entrevista realizada al ingeniero de planta, y los datos proporcionados por el área de laboratorio, se obtuvo una base de datos, para indicar los criterios de operatividad de la caldera. Señalan que, con los documentos y bibliografías consultadas, se pudo promediar y caracterizar las propiedades físicas y químicas del bagazo de caña.

Los autores concluyen que con el balance energético de la caldera se pudo determinar, que con el inyector secundario de aire caliente, el calor aprovechable y las pérdidas de calor sensible por la chimenea aumentaron y a su vez incrementaron el rendimiento en el proceso de combustión. También indican que la instalación del suministrador secundario de aire caliente, aumenta la eficacia térmica en la caldera bagacera, y la instalación del sistema de inyección secundario de aire tiene un costo bajo y recuperable en poco tiempo si se considera el ahorro de combustible.

Rodríguez - Solís, (2006) en el trabajo de investigación sobre valuación del proceso de recuperación de purgas de fondo y de nivel de las calderas piro tubulares en la industria pesquera Austral Group s.a.a. – Coishco, informan que, la valuación del proceso de recuperación de calor mixto preserva el principio básico que compete a los cálculos de balance de masa y balance de energía, alcanzando un rendimiento de los caldero N°01, 02, 03, 04, 05, 06 y 07 de 900 BHP eficiencias de 85%, 85.38%, 84.99%, 84.79%, 84.94%, 85.06% y 84.86% correspondientemente, alcanzándose cuantificar el flujo de condensado de las purgas de nivel y de fondo emanadas por las 07 calderas piro tubulares de la planta de vapor, siendo de 9617.33 Kg de condensado/hora a una presión de 120 PSI.

Los autores de esta investigación señalan que el flujo de vapor flash producido de la recuperación de las purgas de nivel y de fondo de las 07 calderas piro tubulares a una presión de 7.5 PSI es de 1206.01 Kg de vapor flash/hora. El vapor flash producido a 7.5 PSI, para un límite bajo de operatividad de 450 horas por año, produce un ahorro de 9521.6 Gal de petróleo R-500/año, que equivale a \$ 12568.51 USD/año.

Rodríguez y Solís, reportan que el flujo de condensado excedente emanado por el tanque flash a una presión de 7.5 PSI es de 8411.23 Kg de condensado/hora, traspasando un calor de 634 KW al agua blanda alimentada a las 07 calderas por medio de un intercambiador de placas, produciendo así incrementar en 9.11°C la temperatura de entrada del agua blanda a las calderas. El calor obtenido del condensado para un límite bajo de operación de 450 horas por año, produce un beneficio económico de 8110.8 Gal de petróleo R-500/año, que es igual a \$ 10706.26 USD/año.

Los investigadores indican que, que el proyecto del proceso de recolección de calor mixto, escogiendo un Tanque flash Modelo: FV18 de Spirax Sarco y sus complementos adicionales para producir vapor flash a 7.5 PSI y un Intercambiador de calor de Placas Modelo: M10-BFM, Marca: Alfa Laval, con un monto de 46 placas de (375mmx64mm) con espesor de 0.5mm y con acomodo de un paso, obedeciendo a los datos de operación del proceso de recuperación de purgas de calderas.

Los autores concluyen que, el estudio financiero para un horizonte de 10 años de periodo del proyecto, establece un Valor Actual Neto (VAN) de \$ 72384.05 USD, una tasa interna de retorno (TIR) de 52.5% mayor a la tasa de mercado que es de 15%, un tiempo de repago de la inversión (PAY BACK) de 23 meses y una relación de Beneficio-Costo del proyecto de 2.68, donde determina que el proceso de recuperación de calor mixto de las purgas de fondo y nivel es financieramente beneficioso.

En esta investigación, los autores recomiendan avizorar un entendimiento más disciplinado del consumo y ahorro de energía, y estudios en indicativos financieros, es un instrumento a emplear cuando se trata de mejorar sistemas energéticos aplicando una metodología idónea, también de aplicar la Gestión de la energía a través de la compañía a todo el sistema de producción de vapor, para planear, proyectar, incentivar y conformar el grupo humano que interactúa en el sistema de generación, donde tomen responsabilidad de la utilización de la energía, en la vinculación de la energía con la generación, determinando la disminución de los precios.



Recomiendan, además, transmitir a través de eventos de preparación acerca de los beneficios y la importancia de la utilización eficiente y ahorro de energía. También hacer trabajar las 07 calderas piro tubulares de la planta de vapor a valores próximos a los nominales, siendo así más eficientes y la producción de energía sea ideal. Señalan que la compañía debe proveer un presupuesto anual primordialmente en proyectos de mejora de la utilización eficiente y ahorro de energía, permitiendo beneficios económicos a la compañía, teniendo suma importancia al cuidado del medio ambiente, disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera con un global de 129.525 TN de CO<sub>2</sub>/año, refleja un ahorro de \$ 3885.75 USD/año.

Unday, (2012) en su trabajo sobre análisis del impacto ambiental, de la aplicación del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en cuba, para la aplicación de la investigación se presentan un conjunto de técnicas, que posibilito dar una visión holística al fenómeno estudiado, dentro de las que tenemos el análisis de las peculiaridades de la instalación y la línea base del territorio, la valoración empírica de los parámetros de concentración de los contaminantes y el uso de los modelos de dispersión correspondientes, el análisis epidemiológico de los habitantes de la población de Tuinucu, la correlación estadística entre las anteriores variantes, la estimación de los costos externos asociadas a la contaminación, la valorización técnica y económica de soluciones para ayudar a la minimización de esta.

El autor plantea como medida apropiada para minimizar la contaminación de PTS en caldera bagacera la aplicación de un proceso de depuración de gases, esto es viable técnica y económicamente recuperándose la inversión en dos años y medio. Otra medida de disminución, para solucionar la problemática de los CO<sub>2</sub> sería el reemplazo de la problemática de la destilería usando una correcta política de cogeneración.

Ríos Martínez, (2008) en su investigación sobre el diseño y montaje para la implementación del sistema de recolección en Seco y manejo de ceniza en el hogar de las calderas de bagazo, reporta que se diseñó el sistema de recolección en seco de ceniza, con transportador horizontal helicoidal instalado en el cenicero frontal y trasero de las calderas, cubierto por una artesa o canoa; impulsado por un motor reductor, sprockets y cadenas utilizadas para hacer posible la transmisión de potencia del motorreductor y poder generar el movimiento en espiral, el cual hace posible la evacuación de las cenizas emanadas por el hogar de las calderas. Con este sistema se optimizó el funcionamiento del sistema de clarificación y redujo las emisiones nocivas al medio ambiente.

La investigadora señala que el agua inyectada a las calderas es suministrada por el sistema de clarificación por medio de dos bombas con menor capacidad a las de zafra pasadas, con un ahorro de energía de 74,6 kW, y un ahorro de floculante utilizado para la decantación de desechos de q. 70 848 por zafra, durante el tiempo de zafra azucarera.

La autora indica que, con el sistema de recolección en seco se espera un óptimo funcionamiento en tiempo de operación del sistema de clarificación de ceniza, debido a que este sistema únicamente trabajará con el agua procedente de los lavadores de gases (scrubbers), disminuyendo de 1 280 tanque/zafra de agua con ceniza proveniente de las calderas a 800 tanque/zafra teniendo una diferencia de 480 tanque/zafra.

Ríos Martínez, señala que la disminución de emisiones tóxicas al medio ambiente será posible debido a que los lavadores de gases (scrubbers) trabajarán con una mayor presión, limpiando de una mejor manera los gases salientes de la chimenea de las calderas. Indica que se cuantificó un análisis de costos, de donde se obtuvieron los precios de materiales, herramientas, equipos y mano de obra requeridos en la elaboración del proyecto, sumando un costo total de q. 608 387,05 necesarios para la instalación del sistema de recolección en seco de ceniza en el hogar de las calderas de bagazo.

La autora indica que, según el método del valor presente neto (vpn), debido a los cálculos de costo de la inversión, ingresos y egresos que tendrá el proyecto, el tiempo considerado para recuperar la inversión es de 3 años. Se considera un tiempo prudente, es un proyecto que beneficia al ingenio y a todas las regiones aledañas al mismo.

Señala que se capacitó al personal del departamento de calderas, para darles conocer los equipos (motores eléctricos, reductores, sprockets, cadenas de transmisión, chumaceras y cojinetes) que integran el sistema de recolección en seco, explicándoles el tipo de mantenimiento que se debe aplicar cuando inicie la zafra azucarera, así como cuando se encuentren en tiempo de reparación.

La autora recomienda al ingenio, el trabajo de elaborar nuevamente de misión y visión de la empresa. Ya que en la misión se propone la razón por la cual existe la empresa, a continuación, se propone la siguiente: producir caña, azúcar y electricidad con altos estándares de calidad que sobre pasen las expectativas de los clientes y consumidores en el mercado nacional e internacional. También indica que es aconsejable hacer las inspecciones respectivas de las calderas. Se recomienda al ingeniero del área de calderas y al supervisor, verificar junto con los operarios el sistema de recolección en seco antes de iniciar con el arranque de zafra azucarera.

Recomienda, además; a los operarios del departamento de calderas dar mantenimiento preventivo al motor eléctrico, reductor de velocidad, sprockets, chumaceras y cadenas de transmisión, por lo menos una vez por semana, para evitar paradas innecesarias durante el tiempo de zafra, prolongando la vida ideal de los equipos.

(Bosch - Ruiz, (2005) en su trabajo de investigación sobre análisis teórico de las calderas bagaceras, reportan que la eficiencia de la caldera quemando combustible emulsionado (89 % como promedio) es mayor en comparación con el bagazo (79 %), y esto se debe a la intensificación de la transferencia de calor y a un mayor aprovechamiento de la energía total disponible. Además, señalan que la temperatura adiabática en el horno alcanza valores por encima de lo permisible, desde 1 772.5 °C para 10 % de emulsión hasta 1 490.4 °C con 50 %. Para estas calderas, la temperatura de trabajo se encuentra en el orden de los 1 200 a 1 300 °C. La temperatura de los gases al final del horno, entre 1 103.9 °C para 10 % de emulsión y 1 052,3 °C con 50 %, se encuentra por debajo de la temperatura de fusión de la ceniza para este tipo de combustible (1 200 °C), por cuanto se puede pronosticar que la superficie convectiva no recibirá sedimentos como consecuencia de la fusión de la ceniza.

Los autores señalan que, la baja velocidad de los gases en la caldera provoca una disminución de la temperatura del vapor sobrecalentado desde 320 a 285 °C. Este hecho también se debe a la baja formación de gases comparado con la quema de bagazo, y la principal dificultad a que esto conlleva, está relacionada con la disminución de la potencia eléctrica que se debe generar. Además, indican que la temperatura de rocío de los vapores de ácido sulfúrico (de 259 a 278 °C) es superior a la temperatura de los gases de escape (200 °C), lo que evidencia la condensación de estos ácidos sobre la superficie del calentador de aire, por lo que estará presente la corrosión en esta zona de la caldera para las condiciones de operación analizadas.

### **1.3. Teorías relacionadas al tema.**

Para la investigación del desarrollo el presente trabajo, se utilizara las teorías correspondientes, concernientes al tema, la auditoria energética es un método sistemático para lograr un apropiado entendimiento del perfil de los consumos energéticos en una instalación, conociendo y apreciando las probabilidades de ahorro de energía de modo técnico y financiero. Estas valoraciones proponen mejoras en el nivel de los servicios brindados, mejoras económicas y mejoras medioambientales (Tardillo, 2012). Las auditorías facilitan saber la realidad energética actual, el funcionamiento y eficiencia de Planta,

catalogar los primordiales equipos e instalaciones existentes, medir y registrar los primordiales parámetros eléctricos, térmicos y de confort, determinar posibilidad de optimizar suministro de combustibles, energía eléctrica, determinar la probabilidad de implementar energías renovables, sugerir mejoras y realizar su valoración técnica y económica.

El objetivo general de una auditoria es determinar las carencias energéticas de la compañía auditada, incluyendo a todos los equipos y sistemas, se resumen en analizar que forman parte de ella, y dar propuestas de mejora en tema de ahorro de energía y de inclusión de nuevas energías que sean factibles técnicamente y financieramente. (Tardillo, 2012). Algunos objetivos son saber la realidad energética de la empresa, definir con la mejor certeza factible de los consumos reales de la fábrica, indagar cómo se compra y utiliza la energía, dónde se usa y con qué eficacia, elaborar el balance energético total de los equipos e instalaciones en consumos de energía para su cuantificación, establecer las áreas de oportunidad que prestan potencial de ahorro de energía, fijar y evaluar financieramente los volúmenes de ahorro obtenidos y medidas factibles para alcanzarlo, identificar las relaciones de los precios y los beneficios en diversas oportunidades a través del contexto económico y gerencial, para determinar su aplicación, manejar la energía de forma razonable, y obtener ahorros de energía con menor inversión, estudiar la probabilidad en incluir energías limpias en las instalaciones.

Los instrumentos necesarios para la realización de auditorías (Tardillo, 2012) son, entre otros, el analizador de gases de combustión, que determina, los diversos parámetros que fijan las propiedades de la combustión, definiendo el equipo consumidor de combustible: caldera, horno, motor, etc. Dentro de aquellos parámetros sobresalen, por ejemplo: concentración de oxígeno, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOX), óxidos de nitrógeno (NOX), inquemados sólidos, tiro, y temperatura del aire ambiente y de gases, estimación del rendimiento de combustión, indicio de excedente de aire, etc. Su utilización se enfoca en la recepción de una porción de los gases que fluyen por la chimenea o el conducto de humos, recogida por absorción por medio de un orificio realizado en la misma y logrando la acumulación de sus componentes a través de analizadores electrónicos con sensores electroquímicos provistos estos analizadores. (Tardillo, 2012).

Otro importante instrumento en las auditorías energéticas es el caudalímetro, diseñados para determinar el caudal de fluido esparcido por una tubería, normalmente en el estudio que nos aqueja, agua y aire. En la Auditoría Energética, el tipo de caudalímetro a usar generalmente es un caudalímetro ultrasónico portátil, no intrusivo, para determinar el caudal volumétrico sin roce con el líquido. Los caudalímetros de ultrasonidos pueden aplicarse en sitios donde las paredes de las tuberías y el líquido que recorre por ellas dejen la transmisión del sonido. (Tardillo, 2012).

La cámara de termografía se caracteriza por ser procesador de imágenes dando visibilidad la radiación de calor (luz infrarroja) de un objeto o un cuerpo, siendo imperceptible al ojo humano. La termografía posibilita escudriñar y graficar mediciones de temperatura sobre espacios. (Tardillo, 2012). Existen cámaras termográficas que poseen un software de estudio y valoración, para la obtención digital del termograma en determinar un futuro estudio térmico.

El computador portátil es un dispositivo bastante eficaz y efectivo al momento de elaborar auditorias, primordialmente si el auditor utiliza una metodología sistemática, caso contrario, tiende hacer más que una molestia (Tardillo, 2012)

El ordenador portátil admite retirar in-situ parámetros en los dispositivos de medición planificados, incluir claramente parámetros en el formulario de Auditoría, ejecutar cálculos veloces para optar juicios sobre el propio avance de la auditoría, además compartir información a través de correo electrónico o indagar consultas por medio de Internet.

La metodología para ejecutar las auditorías es: Saber la industria, para conocer qué cantidad de energía utiliza, dónde y de qué manera, reconocer y valorar medidas de ahorro y rendimiento energético, posibilitar la ejecución de disposiciones en la planta según su elaboración. (Tardillo, 2012).

La metodología consta del estudio que indica dónde y de qué manera se utiliza la energía en las instalaciones, valoración técnica y financiera de la probabilidad de disminuir el precio de la energía en una instalación, de modo rentable, sin perjudicar la cantidad y el nivel del producto. La metodología planteada en el momento de auditar una empresa está comprendida en 4 pasos, la información preliminar, la recolección de información y mediciones, el estudio energético, las sugerencias y conclusiones (Tardillo, 2012).

Con la información tomada se llegara en la implementación de un diagnóstico, donde brinde saber la realidad actual de consumos, mejora de los equipos y sistemas de la industria en mira al ahorro energético. (Tardillo, 2012).

Comprenderá los siguientes puntos: Medidas de los balances de materia y energía en periodo actual, medidas de rendimientos y consumos específicos, explicación de los procesos aplicados, señalando las características, adaptación tecnológica, consumos, pérdidas y rendimientos de los diversos equipos, procesos e instalaciones, calidad de servicio, estudiando el exceso de utilización o infrautilización de las instalaciones referente a su nivel ideal, Diagramas de flujo de energía.

La industria azucarera usa vapor para generar energía, y para las diferentes operaciones unitarias de fábrica. El vapor convierte en energía eléctrica, la energía térmica contenida del vapor procedente de la quema del bagazo en calderas (Alderete Carlos, 2016).

La energía producida sirve en accionar las diversas maquinarias, dispositivos productivos y auxiliares de la fábrica industrial. El vapor de escape y/o de extracción del turbogenerador y en las turbinas de equipos, provee la energía térmica en la funcionalidad del proceso azucarero y de alcohol.

En los ingenios que poseen destilería anexa se proporciona también la energía para los equipos y el vapor para sus procesos unitarios. Las fábricas azucareras de caña tradicionales operan termodinámicamente bajo un ciclo de Rankine con vapor sobrecalentado y con turbinas de contrapresión, su vapor de escape se utiliza para proporcionar la energía térmica para el proceso, actuando los equipos consumidores como condensadores a presión.

El consumo de potencia y de energía térmica en los ingenios y la relación entre estas dos demandas, depende de muchas variables que pueden variar las proporciones dentro de ciertos rangos. (Tardillo, 2012). Estas variables son la variedad de caña y porcentaje de fibra y tras incluir su limpieza, el sistema de preparación y extracción empleado (trapiche, difusor), el grado de imbibición empleado; el tipo de accionamiento de las maquinarias (turbina, motor eléctrico), la contrapresión de trabajo en turbogeneradores y turbinas de mando, el tipo de equipos y esquema de evaporación-calentamiento y cocimiento, el tipo de equipos y sistema de vacío, la Refinería, destilería y deshidratadora anexas, el tiempo aprovechado, el tipo de calderas y combustibles utilizados. Condiciones de operación, el proceso de recuperación de condensados y agua de reposición, los equipos de control de contaminación ambiental en calderas

Los valores más bajos corresponden a plantas modernas, integradas térmicamente y con modernas tecnologías en la fabricación de azúcar y en alcohol y los valores más altos pertenecen a ingenios antiguos con tecnología convencional y sin integración térmica. (Tardillo, 2012).

El bagazo excedente de la caña de azúcar sirve como combustible en calderas (Alderete Carlos, 2016), su principal parámetro es el Poder calorífico, que es la propiedad energética más importante. (Alderete Carlos, 2016). Hay dos tipos de poderes caloríficos, el Poder calorífico superior  $H_s$ , que es el total de calor obtenida en la quema total de la unidad de masa o volumen de un combustible donde los derivados de la quema llegan a igual temperatura que tenía el combustible y el aire al inicio de la quem ( $25^{\circ}\text{C}$ ) y el agua procedente de la quema y de la humedad del propio combustible esta en fase líquida luego de la quema. (Alderete Carlos, 2016). El Poder calorífico inferior  $H_i$ , siendo el total de calor obtenida de la quema total de la unidad de masa o volumen del combustible donde los derivados de la quema igualan la temperatura que tenía el combustible y el aire al inicio en la quema ( $25^{\circ}\text{C}$ ) y donde el agua procedente en la quema y de la humedad del propio combustible están en fase gaseosa, no habiendo cedido su calor latente de vaporización. (Alderete Carlos, 2016).

$$H_s - H_i = r \left( \frac{9H}{100} + \frac{w}{100} \right) \quad \text{formula(1)}$$

**Datos:**

$r$  = calor latente de vaporización del vapor: 540 kcal / kg.

$H$  = Porcentaje de hidrógeno del bagazo.

$W$  = Porcentaje de bagazo húmedo.

La especificación del poder calorífico superior ( $H_s$ ) se define por medio de la bomba calorimétrica, apeandose a los estándares antes mencionados, y una vez conocido, se lograra medirr por la ecuación anterior el poder calorífico inferior ( $H_i$ ). (Alderete Carlos, 2016).

Las ecuaciones para calcular el poder calorífico superior en bagazo seco (Hsd) (Alderete Carlos, 2016), se hace en fundamento al estudio proximo de la biomasa, Parikh con:

$$\text{Hsd (seco)} = 353.59 * \text{FC} + 155.89 * \text{VM} - 7.79 * \text{A} \quad \text{formula (2)}$$

Siendo:

FC: Porcentaje de carbono fijo.

VM: Porcentaje de materia volátil.

A: Porcentaje de cenizas.

Van Loo et.al, basado en el estudio primordial de la biomasa da la siguiente ecuación (Alderete Carlos, 2016).

$$\text{Hsd(seco)} = 349.1 * \text{C} + 1178.3 * \text{H} + 100.5 * \text{S} - (103.4 * \text{O} + 1.5 * \text{N} + 21.1 * \text{A}). \quad \text{formula (3)}$$

Con una composición termino medio para el bagazo seco de C: 47%, O: 44%, H: 6.5% y A: 2.5% el PC es  $\text{Hsd} = 349.1 * 47 + 1178.3 * 6.5 - (103.4 * 44 + 21.1 * 2.5) = 19464 \text{ kJ / kg}$ , valor aceptable.

La ecuación para calcular el PCS del bagazo húmedo:

$$\text{Hs} = 19605.0 - 196,049 * \text{W} - 196,049 * \text{A} - 31, 14 * \text{B} \quad \text{formula (4)}$$

$$\text{Birkett, et al dan: Hs} = 19410.0 - 194, 10 * \text{W} - 194, 10 * \text{A} \quad \text{formula (5)}$$

$$\text{Hugot, Hs} = 4.600 - 46 * \text{W} - 13 * \text{S} \quad \text{formula (6)}$$

Donde:

W: Porcentaje de bagazo húmedo.

A: Porcentaje de contenido de cenizas.

B: Porcentaje de Brix del bagazo.

S: Porcentaje de cantidad de sacarosa o Pol en el bagazo.

Las 02 ecuaciones iniciales, Hs se enuncia en kJ/kg y en la final se precisa en kcal/kg

El poder calorífico inferior (Hi) para bagazo húmedo (Alderete Carlos, 2016), se hacen con diversas ecuaciones:

$$\text{Lamusse da Hi} = 18309 - 207,63 * \text{W} - 196,049 * \text{A} - 31,14 * \text{B} \quad \text{formula (7)}$$

$$\text{Wienese, Hi} = 18260 - 207, 01 * \text{W} - 182, 6 * \text{A} - 31, 14 * \text{B} \quad \text{formula (8)}$$

$$\text{Davis et.al, Hi} = 18260 - 207, 63 * \text{W} - 182, 6 * \text{A} - 31, 14 * \text{B} \quad \text{formula (9)}$$

$$\text{Hugot, Hi} = 4.250 - 48, 5 * \text{W} - 13 * \text{S} \quad \text{formula (10)}$$



Dónde:

3 W: bagazo húmedo (%),

4 A: contenido de cenizas (%),

5 B: Brix del bagazo (%)

6 S: Porcentaje de cantidad de sacarosa o Pol en el bagazo.

Priemras 03 ecuaciones iniciales, Ho se precisa en kJ/kg y al final se precisa en kcal/kg.

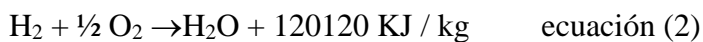
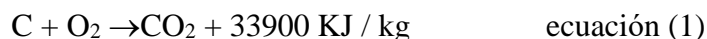
Al aumentar el uso de RAC en proporciones diversas con el bagazo, apareció la cuestión de la presencia de un mayor contenido de cenizas, induciendo a analizar la influencia de este mineral sobre el poder calorífico (Alderete Carlos, 2016). La relación entre la cantidad de cenizas, el poder calorífico del bagazo y RAC fueron estudiadas por Carvajal et.al quienes propusieron algunas relaciones para su manejo. En ellas se observa la variación de Hs con el contenido de cenizas y la disminución del poder calorífico al aumentar las cenizas. Según :

$$\text{Carbajal \& Briceño: } H_s = 21200 - 237*W - 222*A - 50.9*S \text{ formula (11)}$$

$$\text{BSES: } H_s = 19574 - 195.74*(W+A) - 38.177*S \text{ formula (12)}$$

$$\text{Wienese: } H_s = 19605 - 196,05*(W + A) - 31,14*B \text{ formula (13)}$$

La combustión del bagazo ha sido tratada en casi la mayoría de los textos sobre la industria azucarera. Entre estos textos, el de Hugot y Baloh se destacan pues abordan el tema con detalles que le dan un interesante valor. Los derivados reactantes son el bagazo y el aire de combustión y los gases de combustión y cenizas son los productos de la quema. Las reacciones de combustión más importantes son las del C e H<sub>2</sub> según las siguientes ecuaciones (Alderete Carlos, 2016), al quemar un kmol de carbono se tiene:



Los balances de masas de la combustión están referidos a la unidad de masa del combustible, esto es, a 1 kg de bagazo y los volúmenes de gases y aire se expresan en condiciones normales (Nm<sup>3</sup>: 0°C y 760 mm Hg o 1.014 bar). (Alderete Carlos, 2016)

En balances de masas de combustión se calculan (Alderete Carlos, 2016) el Oxígeno mínimo (O<sub>min</sub> o V<sub>omin</sub>): Cantidad mínima de oxígeno que se requiere en la combustión total del combustible, el Aire mínimo o teórico (G<sub>amin</sub> o V<sub>amin</sub>): Cantidad mínima o teórica de aire que contiene el oxígeno mínimo para la combustión completa. Se calculan estas cantidades para el aire seco y el húmedo, el Aire real (G<sub>ar</sub> o V<sub>ar</sub>): Total real de aire que llega

al hogar para su mezcla y distribución adecuada con el bagazo y asegurar la combustión completa. Se determinan para el aire seco y húmedo, los Gases húmedos de combustión (Ggh o Vgh): Total de gases húmedos de combustión resultantes de la combustión completa del bagazo; el coeficiente de excedente de aire: enlace a través del aire real y el aire teórico, las cenizas (Gcz): está formada por todos los materiales minerales no combustibles que constituyen los residuos de la combustión, los gases secos de combustión (Ggs o Vgs): Total de gases secos de combustión resultantes de la combustión completa del bagazo, sin humedad.

Para la composición de gases de combustión, se determinan las cantidades de gases formados por la reacción del C, H<sub>2</sub> y S con el O<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>) y los que acompañan al aire sin participar de la reacción (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>), el englobado límite de CO<sub>2</sub> en los gases secos obtenido con el aire mínimo estequiométrico y que sirve como referencia para el control de la combustión, y las propiedades de la mezcla de gases: peso específico, calor específico, entalpía, entropía, etc. determinados a partir de las propiedades de la mezcla de gases perfectos y su concentración. Los balances de masas se refieren a la unidad de masa del combustible y se expresan en térmicos máscicos [kg./kg] y en forma volumétrica [Nm<sup>3</sup>/kg].

El balance estequiométrico en volúmenes permite calcular los caudales, velocidades y pérdidas de carga en el circuito de aire y gases y la potencia en los ventiladores considerando los cambios de temperaturas de los fluidos en el equipo.

En los balance de masas, se ha introducido una variable esencial del proceso de combustión, el factor de dilución o coeficiente de exceso de aire ( $\lambda$ ), cuyo valor depende de numerosos aspectos tales como (Alderete Carlos, 2016) : tipo de combustible (líquido, sólido o gaseoso), forma de quemado (pila, en suspensión, ciclónica o en lecho fluidizado), distribución y temperatura del aire, geometría y tipo de hogar, humedad, tamaño, distribución y porosidad de las partículas, etc. (Alderete Carlos, 2016).

Para combustión completa, se debe garantizar que toda la masa de bagazo tenga contacto con el oxígeno necesario. Si se usara el mínimo aire requerido estequiométricamente, se correría el riesgo que no todo el material combustible tenga el O<sub>2</sub> necesario y se produzca la combustión incompleta, generando pérdidas.

En la combustión incompleta se tienen las siguientes reacciones, designando con “C” al carbono en el bagazo (Angeleri, 41996):  $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 2200 \text{ Kcal / kg}$  combustión incompleta, además de  $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 8080 \text{ Kcal / kg}$  combustión completa, también de  $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + 2420 \text{ Kcal / kg}$  combustión completa.

La generación de vapor en calderas bagaceras (Alderetes, 2016) la industria azucarera, el vapor se produce en calderas acuotubulares de desplazamiento natural, en donde los gases de combustión se desplazan afuera de los tubos donde la mezcla agua – vapor fluye adentro, transfiriéndose calor a través de ambos fluidos por medio de las paredes tubulares. Para una correcta y clara especificación de calderas, se define la terminología relativa a estos equipos. Parte de la información es provista por los estándares y códigos dispersos internacionalmente sobre el diseño mecánico, construcción, inspección y ensayos de calderas y otra parte vendrá del diseño térmico. (Alderetes, 2016). Estos son: ASME Boiler and Pressure Vessels Code: Secciones I, II, V, VIII, IX y el código de performance PTC 4-2013, Estándares Europeos EN 12952-1/16: Water-tube boilers and auxiliary installations, Indian Boiler Regulations (IBR) 1950, 11th edition - 2010 (ASME Boiler and Pressure Vessels Code. Section I / II / V / IX, NY; 2010).

Estas normas establecen definiciones (Baloh, 1995) como Generador de vapor: Conjunto establecido por la caldera de vapor con uno, algunos o todos los equipos de transferencia de calor y auxiliares, Caldera; establecido en los elementos donde se produce el vapor a presión > atmosférica a través del intercambio de calor con los gases de combustión, Hogar es el recinto del proceso de quema, Sobrecalentador: Equipo dedicado a subir a presión constante la temperatura del vapor saturado producido en la caldera, De sobrecalentador: Dispositivo para disminuir la temperatura del vapor sobrecalentado a valor cercano al de saturación, Atemperador: Dispositivo para disminuir y adecuar la temperatura del vapor sobrecalentado, Economizador: Equipo para subir la temperatura del agua de suministro utilizando parte de la energía de los gases de combustión, calentador de aire equipo dedicado a precalentar el aire de combustión previo al ingreso del hogar utilizando la energía de los gases de combustión, Equipos auxiliares; aseguran el movimiento de aire, gases y cenizas de combustión y suministrar el agua de alimentación y el combustible a la caldera, volumen de vaporización o generación de vapor (Gv); es el máximo vapor capaz de ser generado en forma continua por el equipo y en determinadas condiciones especificadas en el vapor y ciclo de configuración. Se mide en [kg/h, ton/hora] y su valor incluye las purgas especificadas y consumo de vapor de auxiliares. Esta capacidad se llama MCR (Maximum

Continuous Rating) (Baloh, 1995), capacidad pico de vaporización (Gpk), es la máxima capacidad de vapor capaz de brindar el equipo de manera intermitente a determinadas condiciones especificadas en el vapor y ciclo de configuración (Baloh, 1995), presión de trabajo (pt) es la presión a la cual trabaja el equipo de forma permanente en condiciones normales, bar, medida en domo de caldera (Baloh, 1995).

La máxima presión de operación (pmax) es la presión máxima factible a alcanzar en la caldera en situaciones admisibles de seguridad. Enunciada en bar y es aquel valor dado en las tensiones aceptables de diseño, además, la presión de diseño (pd) es la presión en donde se aplica el cálculo mecánico de la caldera y sus partes componentes. La relación de la presión de diseño y trabajo esta fijada por el proyectista del equipo y cambia de acuerdo a los fabricantes entre 1.15 a 1.25. La presión vapor sobrecalentado (pv): es la presión de vapor al final del sobrecalentador enunciada en [kg/cm<sup>2</sup>; bar].

El rendimiento del generador de vapor se define en la conexión dentro de la energía térmica entregada al agua-vapor y la energía térmica aportada por el combustible combustinado, esto es:

$$\eta = Gv (iv - iw) / B.H \text{ [%]} \quad \text{formula (14)}$$

Determinado por la norma utilizada para calcular el rendimiento, se refiere al poder calorífico superior (Hs) o inferior (Hi). Más adelante en el capítulo sobre el ensayo de performance analizaremos nuevamente el concepto de rendimiento según el ASME PTC 4-2013 y el estándar EN 12952-15.

La eficiencia energética de una caldera, se fundamenta en determinar las 6 pérdidas principales en un caldero. El rendimiento de la caldera se calculará con la ecuación (Beltrán, 2008):  $\eta_{\text{energ}} = 100\% - (q_{p1} + q_{p2} + q_{p3} + q_{p4} + q_{p5} + q_{p6}) \%$  Formula (15)

Siendo:

q: Pérdida porcentual de calor por gases residuales [%]

q<sub>p2</sub>: Carencia porcentual de calor por quema incompleta [%]

q<sub>p3</sub>: Carencia porcentual de calor por calor hollín [%]

q<sub>p4</sub>: Carencia porcentual de calor por purgas [%]

q<sub>p5</sub>: Carencia porcentual de calor por convección [%]

q: Carencia porcentual de calor por radiación [%]

#### **1.4. Formulación del problema.**

De acuerdo a las observaciones y estudios efectuados se plantea la presentación del problema de investigación, ¿En qué medida una propuesta de mejora de caldera N° 20 en base a auditoría energética permitirá reducir el precio de generación de vapor en Agroindustrial Cartavio SAA?

#### **1.5. Justificación del estudio.**

La justificación del estudio de investigación tiene el componente técnico, señalando que se podrá establecer e implementar medidas técnicas que aseguren un mejor mantenimiento y lograr, aplicando mejores materiales y repuestos, un mayor tiempo de operación hasta la falla en los elementos de la caldera. La justificación económica se basa en que permitirá establecer medidas de mejora para reducir el precio de generación de vapor sobrecalentado en la caldera N° 20. La justificación laboral es que con la implementación de mejoras, se generará más trabajo en servicio interno y en servicio externo, impulsando el desarrollo del rubro de servicios en metal mecánica y talleres de mantenimiento de equipos térmicos. En el plano interno, se capacitará a los obreros en la operación/mantenimiento de los nuevos equipos y procesos a implementar. En el caso de la justificación tecnológica, se señala que se podrá implementar nuevas tecnologías de combustión, de tratamiento de agua, de transferencia de calor para lograr el objetivo de mejora energética.

#### **1.6. Hipótesis.**

La hipótesis de la presente investigación es que una propuesta de mejora de caldera N° 20 en base a auditoría energética permitirá reducir el costo de generación de vapor en Agroindustrial Cartavio S.A.A.

#### **1.7. Objetivos.**

Esta investigación tiene como objetivo general el de preparar una propuesta técnico económica de mejora de caldera N° 20 en base a auditoría energética para disminuir el precio de generación de vapor en Agroindustrial Cartavio S.A.A.

El presente trabajo tiene como objetivos específicos el de realizar una auditoría energética en la caldera N°. 20 para definir la capacidad actual de generación de vapor, determinar el rendimiento actual de caldera, determinar el consumo actual de combustible

en caldera, determinar el precio actual de generación de vapor. También el de preparar una propuesta técnico económica de mejora en caldera Nro. 20, estableciendo la capacidad proyectada de generación de vapor, el rendimiento térmico proyectada de caldera, el consumo de combustible proyectado en caldera y el precio proyectado de producción de vapor, como tercer objetivo específico se plantea realizar el análisis económico de la mejora energética, para establecer el presupuesto de inversión, determinar los beneficios brutos, costo de mantenimiento, costo de operación, beneficio neto y el retorno de la inversión.

El cuarto objetivo específico es elaborar el estudio económico de la inversión, para hallar el Valor actual neto, VAN; hallar la Tasa Interna de Retorno, TIR; hallar el período de retorno de la inversión, PRI.

El quinto objetivo específico es el de realizar el análisis de impacto medio ambiental de la mejora energética, que permita hacer el análisis de combustión en condiciones actuales para hallar emisiones de gases, el análisis de combustión en condiciones proyectadas hallando emisiones de gases y establecer reducción de gases contaminantes.

## **II. MÉTODO**

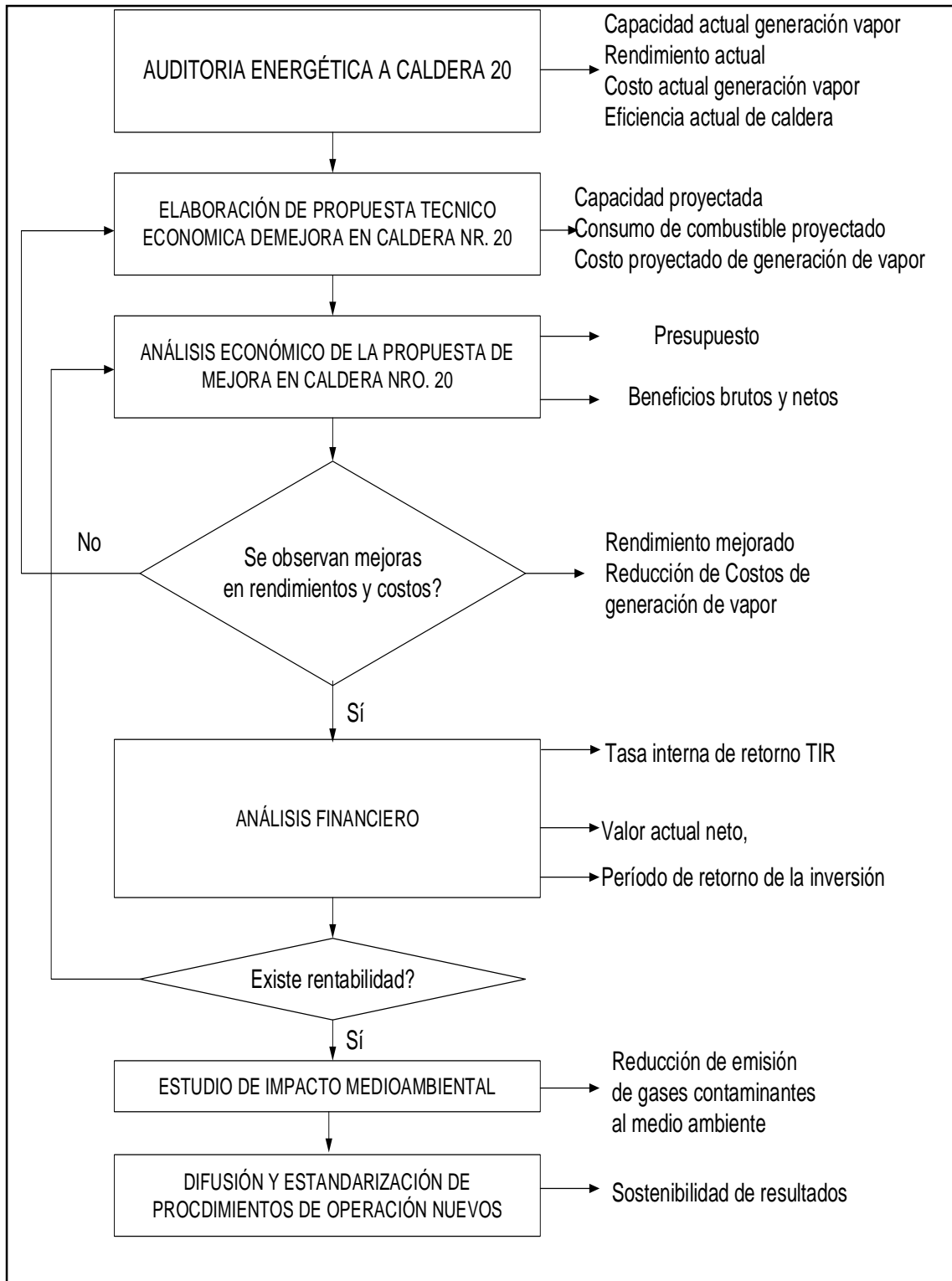
## **2.1. Tipo y diseño de investigación.**

### **Tipo de investigación.**

- Por el tipo de objetivo: Investigación aplicada, trata de disminuir el precio de generación de vapor sobrecalentado en Planta industrial Cartavio SAA.
- Según los datos empleados: Investigación cuantitativa, se aplicarán técnicas matemáticas para analizar el proceso de generación de vapor sobrecalentado.
- De acuerdo al conocimiento que se tiene del objeto de Investigación: Investigación descriptiva, pues se retrata las características del proceso de generación de vapor sobrecalentado en caldera.
- De acuerdo al grado de manipulación de variables: Investigación no experimental, pues no se manipulará ninguna de las variables del proceso de generación de vapor sobrecalentado.
- De acuerdo el tipo específico de las distintas ramas de la ciencia: Estudio de teoría fundamentada, es una investigación diseñada para descubrir qué problemas se presentan en el sistema de generación de vapor sobrecalentado.
- De acuerdo a la forma de estudiar la realidad: Investigación deductiva, se realiza a partir de principios generales de ingeniería térmica y mecánica y, con el apoyo de técnicas de razonamiento, se demuestra el principio secundario.
- De acuerdo al momento/tiempo de estudio: transversal, se reúne datos en un momento del proceso de generación de vapor sobrecalentado para definir variables, analizar su influencia e interrelación en el sistema térmico a mejorar.



### 2.1.1. Diseño de la investigación.



## 2.2. Operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Escala de medición
<b>Variable Independiente : Propuesta tecnico económica de mejora.</b>	Conjunto de medidas técnicas, tecnológicas con enfoque económico a ser aplicadas en caldera para aumentar rendimiento y reducir costos de operación.	Aumento del PCI del bagazo (menor humedad) Menor perdida en gases de combustión.	Propuesta moderada	De razón 0...8000 kJ/kg 0...250 kJ/kg.
<b>Variable dependiente: Rendimiento de caldera.</b>	Relación entre el calor útil aprovechable para generar vapor y el calor total empleado en la combustión.	Conexión dentro del producto del flujo de vapor por la diferencia de entapia vapor y agua y el producto del flujo de combustible por la sumatoria del PCI del combustible y el producto de relación aire combustible por la entalpía del aire.	Rendimiento:  Bajo  Mediano  Elavado	De razón, %  < 80  80<□<85  >85
<b>Variable dependiente: Precio de produccion de vapor.</b>	Expresa el valor monetario de los recursos en combustible, mantenimiento, mano de obra empleados para generar vapor en caldera.	Es la stotalidad de los precios de mano de obra, combustible, mantenimiento raportados entre la cantidad de vapor generap en un intervalo de tiempo.	Costo  Bajo  Medio  Alto	De razón, soles/Ton  < 120  120C<130  >130
<b>Variable interviniente: Variación de PCI del bagazo.</b>	Es la desviación del Poder calorífico inferior del bagazo debido a la variación de calidad de caña o desgaste de equipos de molienda.	Reducción del Poder calorífico inferior del bagazo, debido al aumento de la humedad, de sacarosa residual y cenizas del mismo.	Desviación  Elevada  Moderada  Baja	De razón  0...5% Un (V)  0...2% f (Hz)

<b>Variable interviniente : Variación de entalpía del aire para combustión.</b>	Aumento de la tasa de distorsión de armónicos en corriente y en tensión que afectan la operación de equipos eléctricos por aumento del amperaje y desviación de la onda eléctrica.	Relación entre la Potencia de equipos que generan armónicos y la potencia del transformador.	Tasa de distorsión armónicos elevada.  Tasa de distorsión de armónicos baja.	De razón  THI(v) < 0...10%  THI(I) > 0...5 %
---	--	--	--	--

### 2.3. Población, muestra y muestreo.

**2.3.1.** Población: Calderas acuotubulares a bagazo de la industria azucarera de La Libertad.

**2.3.2.** Muestra: Caldera acuotubular a bagazo N° 20 de Cartavio S.A.A.

### 2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.

<b>Técnica</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Objeto</b>	<b>Objetivos</b>
<b>Observación</b>	Fichas de recolecta de datos.	Proceso de generación de vapor en caldera N° 20 Cartavio S.A.A.	Conocer el sistema térmico de producción de vapor y conocer sus parámetros y el modo en que interactúan entre ellas.
<b>Entrevistas</b>	Fichas de entrevista.	Empleados de operación y de mantenimiento de caldera N° 20.	Fijar aspectos operacionales, de mantenimiento, que brinden realizar un estudio más detallado de las características de equipos térmico de la caldera.
<b>Encuestas</b>	Fichas de encuestas.	Personal ejecutivo de Planta térmica de Cartavio S.A.A.	Definir prioridades e importancia en cuanto a tecnologías, rendimientos, costos y operaciones.

<b>Mediciones</b>	Fichas De mediciones.	Intercambiadores de calor componentes de caldera N° 20.	Establecer los valores reales actuales de los parámetros del sistema de generación de vapor sobrecalentado hallando la capacidad, eficiencia y costos actuales
<b>Estudio registro de datos</b>	Fichas Registro de datos e acontecimientos.	Sistema térmico a vapor de Cartavio S.A.A.	Determinar frecuencia e intensidad de fallas, cambios de equipos y evaluar su vida útil, para posibles sustituciones.
<b>Análisis documental</b>	Literatura de especialidad sobre calderas acuatubulares bagaceras.	Caldera bagacera Cartavio S.A.A.	Analizar tipos de calderas bagaceras y métodos de análisis de capacidades y rendimientos de calderas para bagazo de caña.

## 2.5. Procedimiento.

Luego de definir las técnicas de recopilación de datos, se procederá a su aplicación, de acuerdo al método científico.

Será realizada por el investigador, reconociendo las variables del proceso de generación de vapor sobrecalentado, definiendo su interdependencia, se determina el problema de investigación y la hipótesis, consultando a especialista en el tema.

Se entrevistará al personal de operación y mantenimiento, para analizar el problema y establecer la realidad problemática, así como aspectos de mantenimiento y operacionales que puedan influir en el resultado.

En base a trabajos similares, tesis o artículos científicos, se determina el modo en que se enfoca el problema y la estrategia de desarrollo del estudio para hallar la solución.

Se medirán las variables de proceso de generación de vapor: presiones, temperaturas, flujos mássicos, Poder Calorífico del combustible, luego se establecen los valores promedio para ser aplicadas en las ecuaciones correspondientes. Se aplican las teorías de sistemas térmicos para determinar capacidades, rendimientos y costos actuales, que permitan establecer las medidas técnicas para disminuir el precio de producción de vapor sobrecalentado. Se hará un estudio comparativo a través de los resultados alcanzados y

los de los trabajos previos, que permitan definir el grado de precisión o el método adecuado.

## **2.6. Métodos de análisis de datos.**

Se hallaran estudios descriptivos y analíticos del proceso térmico de generación de vapor sobrecalentado en agroindustrial Cartavio SAA, aplicando ingeniería básica con las ecuaciones de calderas, según la muestra de estudio. Los datos del sistema serán elaborados con estadística descriptiva.

En el estudio cuantitativo, se utilizara la ingeniería básica:

### **Análisis de ingeniería térmica en caldera para determinar:**

- Capacidad de producción de vapor, kg/h
- Potencias útiles promedio, kw
- Potencias térmicas perdidas, kw
- Potencias térmicas total, kW
- Rendimiento, actual y proyectado, %
- Costos de generación de vapor, actual y proyectado, soles/Ton
- Indicadores de proceso, técnico y económicos, soles/ton

Que posibiliten fijar la situación real y proyectada del proceso de generación de vapor sobrecalentado.

### **Análisis económico financiero.**

Se determinan presupuestos de inversión, los beneficios brutos y netos, el valor actual neto, VAN; el período de retorno de la inversión, PRI que permitan determinar la rentabilidad de inversión.

Análisis de impacto medioambiental.

En base a análisis de combustión actual y proyectada se determina la reducción del flujo de emisión de gases contaminantes a la atmósfera, debido a la disminución del consumo de combustible.

Los resultados logrados estarán pasados en gráficos, tablas, etc., para estudiar con precisión los detalles de comportamiento.

## **2.7. Aspectos éticos.**

La información presentada la materia de estudio será desarrollada por los autores, sin plagio de ningún tipo. Es investigación propia.

### **III. RESULTADOS**

### **3.1. Auditoría energética en caldera.**

#### **3.1.1 Características de la caldera N° 20.**

El análisis se realizó en una caldera de tubo de agua tipo tambor. Los tubos de generación de vapor están dispuestos verticalmente entre dos tambores con una línea central vertical común a 9.95 metros. El Sobrecalentador está dispuesto frente al banco de calderas y se apantalla desde el horno por dos filas de tubos.

La caldera está diseñada para el desplazamiento natural del agua y es de tipo con soporte inferior. La caldera estaba equipada con ventilador de tiro inducido, ventilador de tiro forzado y secundario. Los ventiladores de aire con caudales de aire de 3750, 1500 y 460 m<sup>3</sup> / minuto respectivamente para mantener un calado equilibrado dentro del horno.

El paso de gas se confunde en un acuerdo de dos pases para dar Velocidad de transferencia de calor máxima con baja pérdida de tiro y Las velocidades del gas están dentro de los límites aceptados.

El calentador de aire y economizador se utilizaron para mejorar la eficiencia térmica de la caldera mediante la utilización de la alta temperatura va a salir gases de combustión. Una bomba multi etapa de agua de alimentación centrífuga se utilizó para mantener la presión del agua de suministro 1.5 veces la presión del vapor de trabajo.

El grado limite continuo de vapor de la caldera fue de 60 toneladas / hora. El vapor sobrecalentado diseñado. Presión y temperatura fueron 40 kg / cm<sup>2</sup>.y 450 ° C respectivamente.

El pre calentador de aire para combustión y el economizador tienen 1565, 115 y 1015 y 135 m<sup>2</sup>, respectivamente. El hogar es del tipo stroker spreader con un volumen de 254.5 m<sup>3</sup> bajo la condición existente de la planta. Área de la rejilla de descarga del horno tiene 251 m<sup>2</sup>. Consta de ocho secciones.

Cuatro alimentadores de bagazo rectangulares en sección transversal se utilizan para suministrar bagazo desde el portador principal al horno. El bagazo es un material fibroso que queda en el último molino del tándem, después de la extracción del jugo.

### 3.1.2 Balance de masa y energía en caldera N° 20.

#### Datos de operación de caldera:

- Capacidad nominal de generación de vapor: 120,000 kg/h = mv-n
- Capacidad promedio de generación de vapor, en operación: 105,000 kg/h = mv
- Presión absoluta del vapor generado: 43 bar
- Temperatura del vapor generado: 420 °C
- Entalpía del vapor generado: 3,256.30 kJ/kg = hv
- Temperatura del agua de suministro a caldera: 110 °C
- Entalpía del agua a caldera: 462 kJ/kg = hag-alim
- Combustible quemado en caldera: bagazo de caña de azúcar
- Poder Calorífico Inferior del bagazo: 7235 kJ/kg = PCIbgzo
- Rendimiento térmico promedio: 64.20 % = ηcald
- Temperatura de gases de combustión en hogar = 850 °C
- Calor específico del gas caliente en el hogar = 1.29 kJ/(kg\*°C)
- Entalpía del gas caliente del hogar: 1096.50 kJ/kg = hgc
- Temperatura del aire fresco: 178 °C
- Calor específico del aire fresco: 1.17 kJ/(kg\*°C)
- Entalpía del aire fresco: 208.26 kJ/kg = hai

#### 3. Ecuación para el cálculo de la relación aire combustible en caldera, (Ra-cble).

$$R_{a-cble} \left( \frac{kg - aire}{kg - bgzo} \right) = \frac{PCI \left( \frac{kJ}{kg} \right) - h_{gc} \left( \frac{kJ}{kg} \right)}{h_{gc} \left( \frac{kJ}{kg} \right) - h_{ai} \left( \frac{kJ}{kg} \right)}$$

Reemplazando en la ecuación anterior:

$$R_{a-cble} \left( \frac{kg - aire}{kg - bgzo} \right) = \frac{7235 \left( \frac{kJ}{kg} \right) - 1096.50 \left( \frac{kJ}{kg} \right)}{1096.50 \left( \frac{kJ}{kg} \right) - 208.26 \left( \frac{kJ}{kg} \right)} = 6.91$$

Se observa que la relación aire-combustible es 6.91



4. Ecuación para el cálculo del consumo promedio del bagazo de la caldera.

$$m_{bgazo} \left( \frac{kg}{h} \right) = \frac{m_v \left( \frac{kg}{h} \right) * (h_v - h_{ag-alim}) \left( \frac{kJ}{kg} \right)}{\left( PCI_{bgzo} \left( \frac{kJ}{kg} \right) + R_{ai-cble} \left( \frac{kg - ai}{kg - cble} \right) * h_{ai} \left( \frac{kJ}{kg} \right) \right) * \eta_{cal}}$$

Las notaciones de los parámetros son las mismas que figuran en la lista del inicio de los cálculos, tomados de datos de placas y mediciones en caldera.

Reemplazando en la anterior ecuación:

$$\begin{aligned} m_{bgazo} \left( \frac{kg}{h} \right) &= \frac{105,000 \left( \frac{kg}{h} \right) * (3256.30 - 462) \left( \frac{kJ}{kg} \right)}{\left( 7235 \left( \frac{kJ}{kg} \right) + 6.91 \left( \frac{kg \cdot ai}{kg \cdot cble} \right) * 208.26 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \right) * 0.642} \\ &= 52,687 \end{aligned}$$

Se observa que el consumo de bagazo es bastante significativo, de 52.687 ton/h

5. Ecuación para el cálculo del flujo térmico total de caldera, (Qt).

$$Q_t = \frac{m_{bgazo} \frac{kg}{h}}{3600 \frac{s}{h}} * \left( PCI_{bgzo} \frac{kJ}{kg} + \left( \frac{kg - ai}{kg - cble} \right) * h_{ai} \left( \frac{kJ}{kg} \right) \right)$$

Reemplazando en la anterior ecuación:

$$\begin{aligned} Q_t &= \frac{52687 \frac{kg}{h}}{3600 \frac{s}{h}} * \left( 7325 \frac{kJ}{kg} + 6.91 \left( \frac{kg - ai}{kg - cble} \right) * 208.26 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \right) \\ &= 128,264.7 \text{ kw} \end{aligned}$$

Se observa que el flujo térmico total de la caldera es 128,264.7 KW.

6. Ecuación para hallar el flujo térmico útil en caldera, (Qu-cald)

$$Q_{u-cald} = Q_t * \eta_{cald}$$

Reemplazando en la anterior ecuación:

$$Q_{u-cald} = 128,264.7 \text{ kw} * 0.642 = 82,345.93 \text{ kw}$$

Se observa que el flujo térmico útil de la caldera es 82,345.93 Kw.

**7. Ecuación para hallar el flujo térmico total perdido en caldera:**

$$Q_{p-cald}(kw) = Q_t - Q_u$$

Reemplazando en la anterior ecuación:

$$Q_{p-cald}(kw) = 128,264.7 - 82,345.93 = 45,918.77$$

Se observa que el flujo térmico total perdido en la caldera es 45,918.77 Kw.

**3.1.2. Determinación de rendimiento de caldera N° 20 por método indirecto**

**Determinación de pérdidas en caldera:**

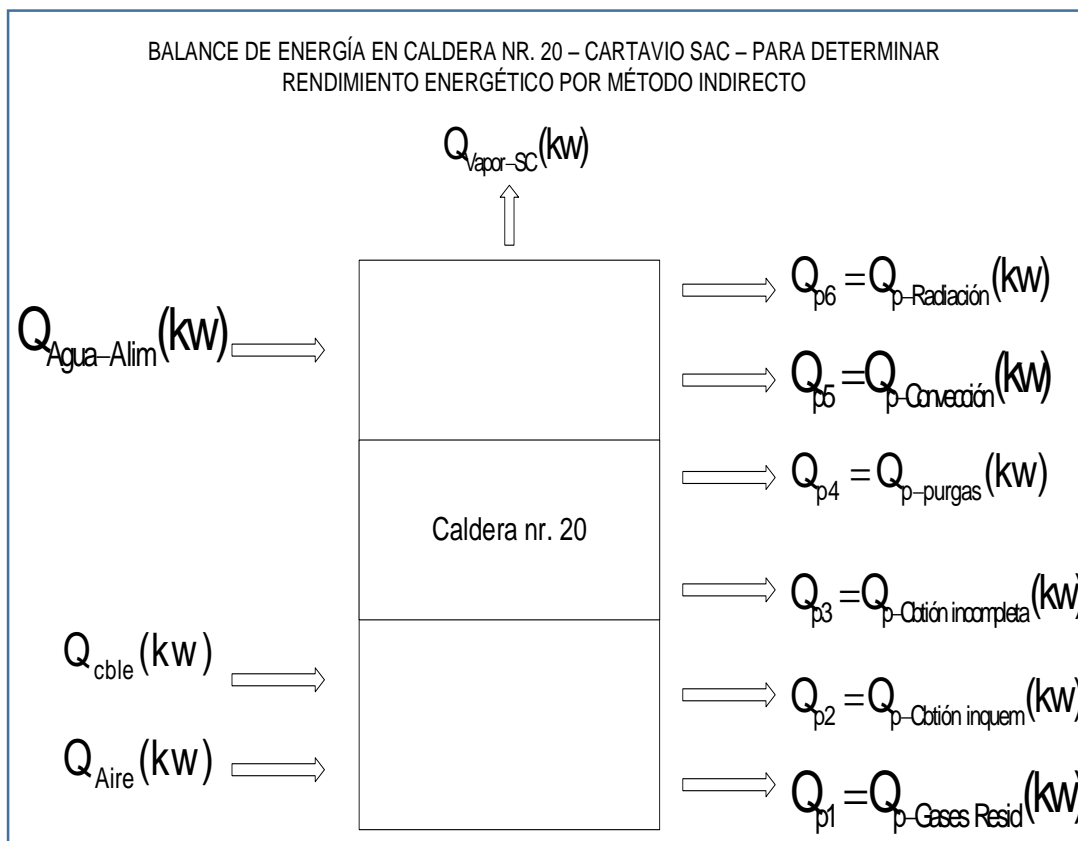


FIGURA 2: Balance de energía de caldera N° 20. Elaboración propia

**a) Por gases de chimenea:**

- Temperatura de gases de chimenea: 280 °C
- Calor específico de gases de chimenea: 1.0983 kJ/(kg\*°C)
- Entalpía de gases de chimenea: 307.524 kJ/kg = hg-chim
- Temperatura ambiente: 25°C

- Calor específico de gases a temperatura ambiente: 1.01 kJ/(kg\*°C)
- Entalpía de gases a temperatura ambiente: 25.25 kJ/kg = h<sub>gc-amb</sub>

**8. Ecuación para hallar el flujo de gases de combustión en caldera, (m<sub>gc</sub>)**

$$m_{gc} = R_{gc-cble} \left( \frac{kg - gc}{kg - bgzo} \right) * m_{bgzo} \left( \frac{kg}{s} \right)$$

Cambiando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$m_{gc} = 7.91 \left( \frac{kg - gc}{kg - bgzo} \right) * \frac{52,687}{3600} \left( \frac{kg}{s} \right) = 115.76 \frac{kg}{s}$$

Se observa que el flujo de los gases de combustión en la caldera es de 115.76 kg/s

**9. Ecuación para determinar el flujo térmico perdido en los gases de la chimenea, Q<sub>p-gchim</sub>**

$$Q_{p-gchim} (kw) = m_{gc} \left( \frac{kg}{s} \right) * (h_{g-chim} - h_{gc-amb}) \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Cambiando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Q_{p-gchim} (kw) = 115.76 \left( \frac{kg}{s} \right) * (307.524 - 25.25) \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 32,676$$

Se observa que la pérdida térmica en los gases de la chimenea de la caldera es significativa, de 32,676 kw

**10. Ecuación para hallar % de carencia de los gases en la caldera.**

$$Q_{p-gchim} (%) = \frac{Q_{p-chim}}{Q_{p-t}} * 100$$

Cambiando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\rightarrow Q_{p-gchim} (%) = \frac{32,676 \text{ kw}}{128,264.7 \text{ kw}} * 100 = 25.47 \%$$

El dato obtenido Representa el 25.47 % del calor total en caldera, es la principal pérdida.

**b) Pérdida por combustión incompleta del bagazo, Q<sub>p2</sub>.**

- Densidad de gases de combustión: 0.6956 Kg/m<sup>3</sup> (ρ<sub>Gases Cbtión</sub>)
- Flujo másico de gases residuales: 115.76 Kg/s. (m<sub>gc</sub>)

**11. Ecuación para hallar la perdida por combustión incompleta del bagazo**

$$\dot{V}_{\text{Gases Cbtión}} = \frac{m_{gc} \frac{Kg}{s}}{\rho_{\text{Gases Cbtión}} \frac{Kg}{m^3}}$$

Cambiando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\dot{V}_{\text{Gases Cbtión}} = \frac{115.76 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}}{0.6956 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 166.42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se observa que la carencia por quema incompleta del bagazo es:  $166.42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Del análisis de gases residuales, se tiene una participación volumétrica del CO de 0.097%. El PCI, poder calorífico inferior del carbono es  $12,720 \text{ KJ/m}^3$ .

**12. Ecuación para hallar la pérdida de calor en la caldera por combustión incompleta.**

$$Q_{p2} = \dot{V}_{\text{Gases Cbtión}} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * P_{\text{v}} - \text{CO} * \text{PCI} - C \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Q_{p2} = 166.42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 0.00097 * 12,720 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3} = 2053.35 \text{ kw}$$

Se observa que la carencia de calor por quema incompleta en la caldera es:  $2053.35 \text{ kw}$

**13. Ecuación para hallar la carencia porcentual de calor en caldera por combustión incompleta:**

$$q_{p2} = \frac{Q_{p2}}{Q_t} * 100$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$q_{p2} = \frac{Q_{p2}}{Q_t} * 100 = \frac{2053.35 \text{ kw}}{128,264.7 \text{ kw}} * 100 = 1.60 \%$$

Se observa que el porcentaje de perdida por combustión incompleta es:  $1.60\%$

**c) Pérdida de calor por inquemados, Qp3.**

- Flujo másico de gases residuales:  $115.76 \text{ kg/s}$  ( $m_{gc}$ )
- Participación másica de C en gases:  $0.085\%$  ( $Pm - C$ )
- PCI del carbono:  $33,900 \text{ kJ/kg}$ . ( $\text{PCI} - C$ )

**14. Ecuación para hallar la pérdida de calor inquemados en la caldera.**

$$Q_{p3} = m_{gc} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * Pm - C * \text{PCI} - C \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Q_{p3} = 115.76 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 0.00085 * 33,900 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 3335.62 \text{ kw}$$

Se observa que la perdida de calor por inquemados en la caldera es:  $3335.62 \text{ kw}$ .

**15. Ecuación para hallar la pérdida porcentual de calor en caldera por inquemados:**

$$q_{p3} = \frac{Q_{p3}}{Q_t} * 100$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$q_{p3} = \frac{1373.5 \text{ kw}}{128,264.7 \text{ kw}} * 100 = 2.60 \%$$

Se observa que el porcentaje de carencia de calor en la caldera por inquemados es: 2.60%

**d) Pérdida de calor por purgas en caldera, Qp4**

Flujo másico de purgas.

- El flujo másico de vapor producido: 29.167 kg/s = 105,000 kg/h
- Sólidos disueltos totales del agua de suministro 170 ppm
- Sólidos disueltos completos de purgas 2000ppm
- Sólidos máximo admisibles en caldera: 3000 ppm

**16. Ecuación para hallar la pérdida de calor por pulga en la caldera.**

$$\dot{m}_{\text{purgas}} = \left( \frac{S. \text{dis} - A. \text{alim}}{(S. \text{dis} - \text{Max}) - (S. \text{dis} - \text{Tot})} \right) * mv \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\rightarrow \dot{m}_{\text{purgas}} = \left( \frac{170 \text{ ppm}}{3000 \text{ ppm} - 2000 \text{ ppm}} \right) * 29.167 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 4.96 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Se observa que la carencia de calor por las purgas de la caldera es:  $4.96 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$

Es elevado el flujo de purgas, se debe analizar la probabilidad de aplicar un proceso de ósmosis inversa para el agua de alimentación. También analizar la factibilidad de utilizar el vapor flash generado por las purgas.

- Entalpia de líquido saturado, a 280 °C es: 1176 KJ/Kg (hliq-sat).
- Entalpia de líquido saturado del agua de suministro: 460 KJ/Kg. (hliq-sat-alim).

**17. Ecuación para hallar la carencia de calor por las purgas de la caldera.**

$$Q_{p4} = 4.96 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * \left( h_{\text{liq\_sat}} \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - h_{\text{liq\_sat\_alim}} \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\rightarrow Q_{p4} = 4.96 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * \left( 1176 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 460 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) = 3551.36 \text{ kw.}$$

Se observa que la carencia de calor por las purgas de la caldera es: 3551.36KW.

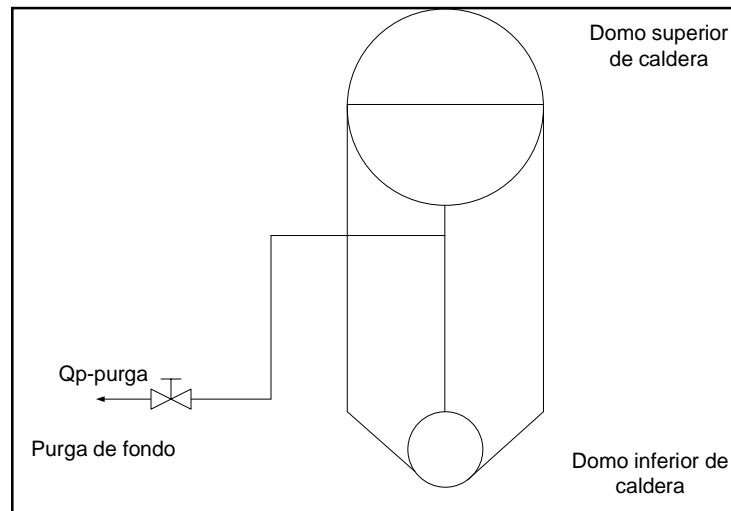
**18. Ecuación para hallar la carencia porcentual de calor por las purgas de la caldera.**

$$q_{p4} = \frac{Q_{p4}}{Q_t} * 100$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$q_{p4} = \frac{3,551.36 \text{ kw}}{128,264.7 \text{ kw}} * 100 = 2.77 \%$$

Se observa que el porcentaje de carencia de calor por las purgas de la caldera es: 2.77%



**FIGURA 3: Esquema de purga de fondo en caldera N° 20. Elaboración propia**

**e) Pérdida de calor por convección de pared exterior de caldera al medio ambiente.**

Ancho de caldera: 13.5 m. Longitud de caldera: 10.45 m. Altura de caldera: 22.40 m

Hallando la superficie lateral de caldera:

$$S_{L-Cald} = 2 * (13.5 \text{ m} * 22.40 \text{ m} + 10.45 * 22.40) = 1072.96 \text{ m}^2$$

Hallando el coeficiente de transferencia de calor pared medio ambiente, velocidad del aire:

5.25 m/s.

$$h_{p \rightarrow \infty} = 11.6 + 6.96 * \sqrt{5.25} = 27.55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- Temperatura de pared exterior de caldera: 65°C,
- Temperatura ambiental promedio: 25°C.

Hallamos la carencia de calor por convección en **la caldera.**

$$Q_{p5} = \frac{1072.96 \text{ m}^2 * 27.55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} * (65 - 25) ^\circ\text{C}}{1000} = 1,182.40 \text{ kw}$$

**Hallamos la carencia porcentual de calor en caldera por convección:**

$$q_{p5} = \frac{Q_{p5}}{Q_t} * 100 = \frac{1,182.40 \text{ kw}}{128,264.7 \text{ kw}} * 100 = 0.92 \%$$

f) Pérdida de calor por radiación en caldera.

- Flujo de gases de combustión: 115.76 kg/s,
- Calor específico promedio de gases en Hogar de caldera: 1.325 KJ/(kg\*°C).

Hallamos la Temperatura de gases calientes,  $T_{\text{Gases de Cbtión}}$ :

$$T_{\text{Gases de Cbtión}} = \frac{128,264.7 \text{ KW}}{115.76 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1.325 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 836.24 \text{ °C} = 1109.40 \text{ °K}$$

Y la temperatura de la pared del hogar de la caldera:

$$T_h = 836.24 \text{ °C} - 10.5 \text{ °C} = 825.74 \text{ °C} = 1098.89 \text{ °K}$$

Emisividad de las paredes de ladrillo del hogar de la caldera: 0.73,

Coefficiente de radiación de Boltzmann:  $5.67 * 10^{-8} \text{ w}/(\text{m}^2 * \text{°K}^4)$

Largo del hogar 9.5 m

Ancho del hogar: 8.45 m

Número de hogares: 2, Hogar lado izquierdo y Hogar lado derecho

Superficie total del hogar:  $2 * (9.5 * 8.45) = 160 \text{ m}^2$

$$Q_{p6} = \frac{0.73 * 5.67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{°K}^4} * 160 \text{ m}^2 * (1109.4^4 - 1099^4) \text{ °K}^4}{1000} = 374.78 \text{ kw}$$

Hallamos la pérdida porcentual de calor en caldera por radiación:

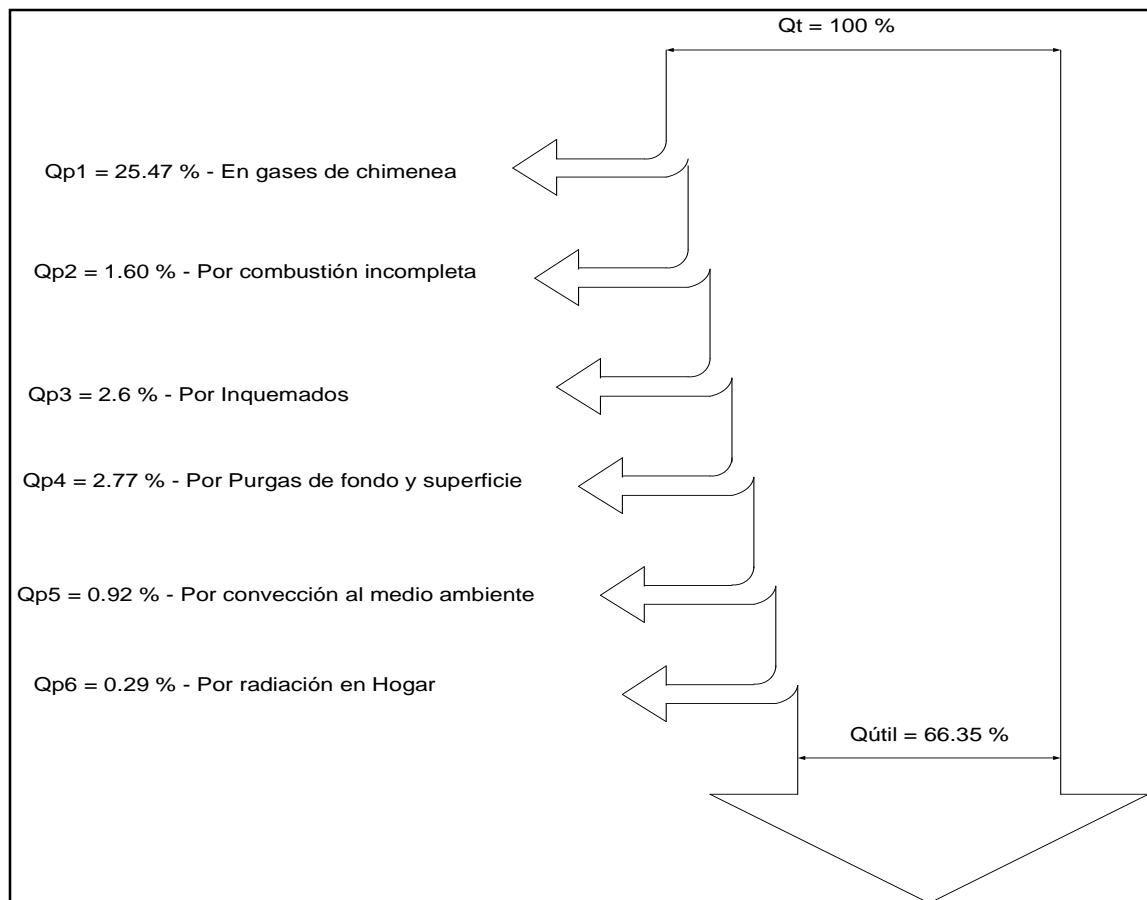
$$q_{p6} = \frac{Q_{p6}}{Q_t} * 100 = \frac{374.78 \text{ kw}}{128,264.7 \text{ kw}} * 100 = 0.29 \%$$

Entonces, la eficiencia energética de la caldera en condiciones actuales, es:

$$\eta_{\text{energ-Cal}} = 100\% - (25.47 + 1.60 + 2.6 + 2.77 + 0.92 + 0.29) \% = 66.35 \%$$

La eficiencia de la caldera nr. 20 difiere en 2.15 % del valor dado por el personal de Cartavio, que es de 64.2 %, de todos modos, el valor es bajo.

Diagrama de Sankey de energía para la caldera N°. 20 de Cartavio S.A.A.



**FIGURA 4: diagrama de Sankey de energía para la caldera N°20 de Cartavio S.A.A. Elaboración propia.**

### 3.1.3. Análisis de eficiencia de caldera por método de Hugot (Para caldera bagacera).

#### 3.1.3.1. Cálculo del poder calorífico del bagazo .

El valor calorífico del bagazo depende principalmente de la humedad y contenido de sacarosa en bagazo. Los valores medios fueron tomados como:

- Contenido de humedad del bagazo (w) = 51.22%
- Sacarosa en bagazo (s) = 3.0%

Los valores caloríficos se calcularon utilizando fórmulas. (Hugot, 1986)

Poder Calorífico Superior del bagazo.



$$\begin{aligned} \text{PCI}_{\text{Bgzo}} &= 8280 * (1 - w) - 2160 * s = 82080 - (1 - 0.50) - 2160 * 0.03 \\ &= 4075 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = 9469.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

#### **Poder Calorífico Inferior del bagazo**

$$\begin{aligned} \text{PCI}_{\text{Bgzo}} &= 7650 - 8730 * w - 2160 * s = 7650 - 8730 * 0.5122 - 2160 * 0.03 \\ &= 3113.37 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = 7235 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Ambas ecuaciones incluyen el calor latente de vaporización del agua formada durante la quema del hidrógeno contenido en el bagazo y el calor latente de vaporización del agua en bagazo.

#### **3.1.3.2. Eficiencia de la caldera sobre la base de temperatura de gases de combustión.**

Durante el funcionamiento de la caldera, la temperatura de los gases residuales se mantuvo entre límites de 525 a 536 ° F (280 ° C). el valor promedio de los gases de combustión se tomó como 530 ° F.

Para calcular el vapor obtenible a partir de peso unitario de bagazo, siguiendo pérdidas de calor, se consideraron en el horno y en la caldera.

- a) Calor latente del agua formada por la combustión de Hidrógeno en el bagazo.
- b) Calor latente de vaporización del agua contenida en el bagazo.
- c) Perdida de calor sensible en los gases de combustión que salen de la caldera.
- d) Carencia por sólidos no quemados.
- e) Carencia por radiaciones del horno y en especial de caldera.
- f) Carencia por combustión incompleta de carbono, dando CO en lugar de CO<sub>2</sub>.

De estas seis pérdidas, (a) y (b) ya han sido considerado en la ecuación (1) y la ecuación (2) al calcular Poder calorífico del bagazo.

#### **3.1.3.3. Calor sensible perdido en gases de la chimenea.**

Se utiliza la ecuación (Hugot, 1986):  $q = [(1 - w) (1.4 m - 0.13) + 0.5] (t - 32)$  Eq. (3).

Dónde:

- 3  $q$  = Pérdida de calor sensible en los gases de combustión en BTU / lb de bagazo
- 4  $t$  = Temperatura de los gases de combustión en la pila. Su valor es tomado como 530 ° F
- 5  $w$  = Peso de humedad por unidad de peso de bagazo.
- 6  $m$  = Relación del peso del aire real necesitado para la combustión al peso teóricamente necesario.

El valor de  $m$  depende del tipo de horno utilizado para el horno stroker del esparcidor, el exceso de aire requerido es el 50% del aire teórico requerido (Hugot, 1986). Su valor es 1.60. Sustituyendo estos valores en la ecuación. (3)

$$q = [(1 - 0.5122)(1.4 * 1.60 - 0.13) + 0.5] * (530 - 32) = 761.57 \text{ BTU/lb}$$

Las carencias por inquemados, por radiación en el hogar y por combustión incompleta, se toman en cuenta con los coeficientes aplicados al total.

#### **3.1.3.4. Cantidad de calor que todavía está disponible después de las primeras tres pérdidas.**

El calor restante que se transfiere al vapor, el calor útil; está dada por la expresión. (Hugot, 1986).

$$Mv \left( \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \right) = (7650 - 2160 s - 8730 w - q) * \alpha * \beta * \gamma, (4),$$

Dónde:

3.  $\alpha$  = Coeficiente de carencia de calor por inquemados. Para hornos de Stroker spreader: 0.95.
4.  $\beta$  = Coeficiente de pérdidas de calor por radiación, varía de 0.92 a 0.98. Su valor se toma 0.94.
5.  $\gamma$  = Coeficiente de combustión incompleta. Su valor se toma como 0.92 para calderas antiguas.
6.  $Mv$  = Calor unitario neto transferido al vapor en BTU / lb. Sustituyendo los valores de  $w$ ,  $s$ ,  $q$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$

$$\begin{aligned} Mv &= [(7650 - 2160 * 0.03 - 8730 * 0.50) - 761.57] * 0.95 * 0.94 * 0.92 \\ &= 2119.91 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \end{aligned}$$

Eficiencia de la caldera nr. 20:

$$\eta_{\text{Cald}} = \frac{M_v}{\text{PCI}} = \frac{2119.91}{3113.37} = 64.87 \%$$

64.87 es un valor bajo, es necesario mejorar.

### **3.2. Preparar una propuesta técnico económica de mejora en caldera Nro. 20.**

En base a la auditoría realizada a la caldera N°. 20, se determina una propuesta de mejoras.

#### **3.2.1 Capacidad proyectada de generación de vapor.**

La capacidad operativa promedio actual es de 105,000 kg/h de vapor, la capacidad nominal es de 120,000 kg/h.

#### **3.2.2 Rendimiento térmico proyectado de caldera.**

Se encontró que el Poder calorífico del bagazo, es bajo, debido al alto contenido de humedad, del orden de 51.22 % en promedio. En modo normal, debe ser de 48. %, para lo cual se deberá realizar un cambio de mazas anual, del orden de 6 por año, y un proceso de recuperación de las mazas con recubrimiento duro con soldadura eléctrica, depositando un promedio de 300 kg de soldadura base y de 250 kg de soldadura de recubrimiento duro, tres veces por año para cada una de las 15 mazas del tándem de molinos.

Otro parámetro que está muy elevado e influye negativamente en la eficiencia y el consumo de combustible de la caldera, es la temperatura de los gases mínimos de combustión, que es de 280 °C, actualmente, se debe tener 180°C = 356 °F, en donde es primordial aplicar un plan de mantenimiento en los pre calentadores de aire para combustión, pues tiene tubos rotos y obstruidos por las cenizas contenidas en el aire de combustión, además de programar una mejor frecuencia de limpieza, de 1 cada 15 día en lugar una por mes, como se hace actualmente.

En las condiciones consideradas, se determina los valores del PCI, de pérdidas den caldera y el rendimiento proyectado.

Poder calorífico Inferior proyectado del bagazo.

- Contenido proyectado de humedad en el bagazo (w) = 48.5%
- Sacarosa en bagazo (s) = 1.5%

### Poder Calorífico Inferior del bagazo

$$\begin{aligned} \text{PCI}_{\text{Bgzo}} &= 7650 - 8730 * w - 2160 * s = 7650 - 8730 * 0.485 - 2160 * 0.018 = 3,377 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \\ &= 7847.43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

### Calor sensible proyectado perdido en gases de la chimenea

$$\begin{aligned} q &= [(1 - w)(1.4 m - 0.13) + 0.5](t - 32) \\ &= [(1 - 0.485) * (1.4 * 1.60 - 0.13) + 0.5] * (356 - 32) \\ &= 514 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \end{aligned}$$

**M<sub>v</sub>** = Calor unitario neto transferido al vapor. Se sustituyendo los valores de w, s, q, α, β y γ

$$\begin{aligned} M_v &= [(7650 - 2160 * 0.02 - 8730 * 0.485) - 514] * 0.96 * 0.95 * 0.94 \\ &= 2438 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \end{aligned}$$

**Eficiencia proyectada de la caldera N°. 20:**

$$\eta_{\text{Cald}} = \frac{M_v}{\text{PCI}} * 100 = \frac{2438}{3377} = 73.67 \%$$

Se observa que se obtendría un valioso aumento de la eficiencia de la caldera, de 73.67 – 64.20 = 9.47 %, con lo cual se obtendría una importante disminución del consumo de bagazo.

### Disminución proyectada del consumo de bagazo en nuevas condiciones

$$m_{\text{bgazo}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{m_v \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * (h_v - h_{\text{ag-alim}}) \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{\left( \text{PCI}_{\text{bgzo}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + R_{\text{ai-cble}} \left( \frac{\text{kg} - \text{ai}}{\text{kg} - \text{cble}} \right) * h_{\text{ai}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right) * \eta_{\text{cal}}}$$

**Reemplazando en la anterior ecuación:**

$$m_{\text{bagazo}} = \frac{105,000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) * (3256.30 - 462) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{\left(7,487.43 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + 6.91 \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{ai}}{\text{kg} \cdot \text{cble}}\right) * 208.26 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)\right) * 0.7367}$$
$$= 44,616 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se observa que, con las mejoras proyectadas a ser aplicadas, se obtendría una reducción del bagazo en calderas, del orden de:  $52,687 - 44,616 = 8,071 \text{ kg /h}$ .

### **3.3. Análisis económico de la mejora energética.**

#### **3.3.1. Presupuesto de inversión.**

Inversión para aumentar el PCI del bagazo.

Consiste en cambiar seis mazas de molinos de caña, para reemplazar a las antiguas, sometidas a intenso desgaste por abrasión.

- Número de mazas a comprar: 6 por año,
- Precio unitario de maza: 54450 soles.

Total, inversión en mazas nuevas:

$$6 \text{ mazas} * 54,450 \text{ soles/maza} = 326,700 \text{ soles/año}$$

Mano de obra para instalar mazas:

- 7 trabajadores.
- Costo unitario de mano de obra: 10.25 soles/HH.
- Tiempo destinado para cambio de una maza: 64 horas.

Total, costo mano de obra en cambio de mazas:

$$6 \text{ mazas} * 64 \text{ horas} * 7 \text{ trabajadores} * 10.25 \text{ soles/HH} = 28,224 \text{ soles.}$$

Gasto en herramientas: 4500 soles.

Total, inversión en cambio de mazas nuevas:

$$326,700 + 28,224 + 4,500 = 359,424 \text{ soles/año.}$$

Inversiones en recuperación de mazas por soldadura:

Inversiones en proceso de soldadura base.

- Número de mazas a recuperar: 15 por año.

- Soldadura base: 300 kg de Exaniquel/maza.
- Precio unitario de Exaniquel: 47 soles/kg.

Total, costo de soldadura base:

$$15 \frac{\text{mazas}}{\text{año}} * 300 \frac{\text{kg}}{\text{maza}} * 47 \frac{\text{soles}}{\text{kg}} = 211,500 \frac{\text{soles}}{\text{año}}$$

Mano de obra en depósito de soldadura base:

$$125 \text{ hh/maza} * 10.25 \text{ soles/hh} * 15 \text{ mazas/año} = 19,218.75 \text{ soles/año.}$$

Inversiones en proceso de soldadura de recubrimiento duro:

- Número de mazas a recuperar: 15 por año.
- Soldadura recubrimiento duro, citodur 600: 250 kg de Exaniquel/maza.
- Precio unitario de citodur 600: 27 soles/kg.

Total, costo de soldadura base:

$$15 \frac{\text{mazas}}{\text{año}} * 250 \frac{\text{kg}}{\text{maza}} * 27 \frac{\text{soles}}{\text{kg}} = 101,250 \frac{\text{soles}}{\text{año}}$$

Mano de obra en depósito de soldadura de recubrimiento duro:

$$115 \text{ hh/maza} * 10.25 \text{ soles/hh} * 15 \text{ mazas/año} = 17,681.25 \text{ soles/año.}$$

Total, inversión anual en recuperación de mazas por soldadura eléctrica:

$$211,500 + 19,218.75 + 101,250 + 17,681.25 = 349,650 \text{ soles/año.}$$

Inversión en optimización del aislamiento térmico de caldera:

Inversión de colchonetas de lana mineral:

- Colchonetas de lana mineral, espesor: 1.5 pulgadas x 15 m x 0.6 m.
- Número de colchonetas: 35 piezas.
- Precio unitario de colchoneta: 330 soles/colchoneta:

Precio total de colchoneta:

$$35 \text{ colchonetas} * 330 \text{ soles/colchoneta} = 11,550 \text{ soles.}$$

Inversión en mano de obra instalación de colchonetas de lana mineral:

- Total, trabajadores: 6 personas.
- Tiempo de trabajo: 80 horas/persona.
- Costo unitario de M.O.: 10.25 soles/hh.

Costo total de M.O.:

$$6 \text{ personas} * 80 \text{ h/persona} * 10.25 \text{ soles/hh} = 4,920 \text{ soles.}$$

Inversión en planchas de acero galvanizado,

- Dimensiones de planchas: 0.5 mm x 2.4 x 4.8.

- Número de planchas metálicas: 28 piezas.
- Costo unitario de plancha de Fe galvanizado: 62 soles/pieza.

Precio total de planchas de Fe galvanizado:

$28 \text{ piezas} * 62 \text{ soles/pieza} = 1736 \text{ soles.}$

Inversión en mano de obra instalación de planchas de Fe galvanizado:

- Total, trabajadores: 6 personas.
- Tiempo de trabajo: 50 horas/persona.
- Costo unitario de M.O.: 10.25 soles/hh

Costo total de M.O.:

$6 \text{ personas} * 50 \text{ h/persona} * 10.25 \text{ soles/hh} = 3,075 \text{ soles.}$

### **Inversión en reparación de calentadores de aire por gases.**

Número de calentadores: 2

Inversión unitaria: 140,500 soles/calentador.

Total, inversiones en reparación de calentadores de aire:  $2 * 140,500 = 280,000 \text{ soles.}$

Inversiones en mejoras en Caldera:

$11,500 + 4,920 + 3,075 + 1,736 + 280,000 = 301,231 \text{ soles.}$

Gasto en mantenimiento de mazas de molinos: 349,650 soles/año

Inversión total año 1:  $359,424 + 301,231 = 660,655 \text{ soles.}$

### **Beneficios económicos por aumento de rendimiento de eficiencia en caldera:**

- Reducción de consumo de bagazo:
  - $8,071 \text{ kg /h} = 8.071 \text{ Ton/h.}$
- Tiempo de operación anual: 8,000 h/año.

Bagazo ahorrado por año:  $8.071 \text{ Ton/h} * 8,000 \text{ h/año} = 64,568 \text{ Ton bagazo/año.}$

Precio de venta del bagazo: 61 soles/Ton (dato de Planta Cartavio).

Beneficio económico bruto por venta de bagazo:

$64,568 \text{ Ton/año} * 61 \text{ soles/Ton} = 3'938,648 \text{ soles/año.}$

Beneficio neto anual:  $3'938,648 - 349,650 = 3'588,998 \text{ soles/año.}$

Tiempo de retorno de la inversión, PRI:

$$\text{PRI} = \frac{\text{Inversión (Soles)}}{\text{Beneficio Neto} \left( \frac{\text{Soles}}{\text{año}} \right)} = \frac{660,655}{3'588,998} = 0.184 \text{ años} = 2.2 \text{ meses}$$

**Nota:** Este proceso de inversiones en mejoras debe hacerse cada tres años, que es el período de vida ideal de mazas y tubos de calentadores de aire en caldera.

Análisis de impacto medio ambiental de la energética mejora

Por ser una mezcla de componentes, se aplicará el método de análisis de combustión Base 100.

**Composición química del bagazo húmedo:**

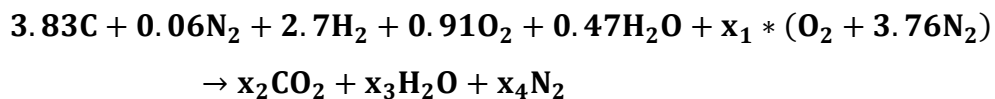
Componente del bagazo	Masa M	Masa Molar Mm	Nr. Moles Nm
	kg	kg/kmol	Kmol
<b>Carbono</b>	46	12	3.83
<b>Nitrógeno</b>	1.8	28	0.06
<b>Hidrógeno</b>	5.4	2	2.70
<b>Oxígeno</b>	29.1	32	0.91
<b>Agua</b>	16	34	0.47
<b>Cenizas</b>	1.7		
<b>Total</b>	100.00		

*Tabla 3: composición química del bagazo.*

### 3.3.2. Análisis de combustión perfecta.

Combustión del combustible actual, Bagazo húmedo.

**Balance estequiométrico en combustión perfecta del Bagazo:**



**Determinación del número de kmol de cada componente:**

$$\text{C: } x_2 = 3.83$$

$$\text{H: } = 2.7 * 2 + 0.47 * 2 = 2x_3 \rightarrow x_3 = 3.17$$

$$\text{O: } 0.91 * 2 + 0.47 * 1 + 2x_1 = 3.83 * 2 + 3.17 * 1 \rightarrow x_1 = 4.27$$

$$\text{N: } 0.06 * 2 + 4.27 * 3.76 * 2 = 2x_4 \rightarrow x_4 = 16.115$$

Combustión completa del bagazo húmedo.

Se determina el coeficiente de exceso de aire,  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{m_{\text{aire-real}}}{m_{\text{aire-teór}}}$$



**De la relación aire – combustible:**

$$R_{a-cble} = 6.91 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg - cble}} = \frac{m_{\text{aire real}}}{m_{\text{cble}}} = \frac{m_{\text{aire real}}}{100 \text{ kg}}$$

Resulta la masa real del aire: 6910 kg de aire.

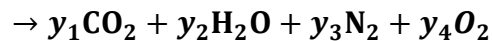
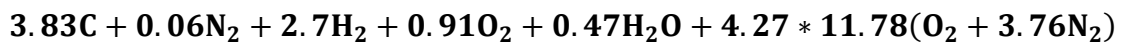
**La masa teórica de aire resulta del balance perfecto:**

$$4.27 \cdot (32 + 3.76 \cdot 28) = 586.18 \text{ kg.}$$

Por lo tanto, el coeficiente de exceso de aire,  $\lambda$  es:

$$\lambda = 6910 / 586.18 = 11.78$$

**En la combustión total se generan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> libre:**



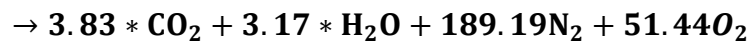
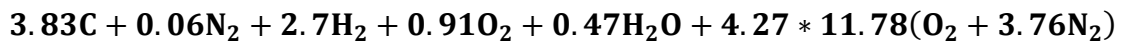
$$\text{C: } y_1 = 3.83$$

$$\text{H: } 2.7 \cdot 2 + 0.47 \cdot 2 = 2y_2 \rightarrow y_2 = 3.17$$

$$\text{N: } 0.06 \cdot 2 + 4.27 \cdot 11.78 \cdot 3.76 \cdot 2 = 2y_3 \rightarrow y_3 = 189.19$$

$$\text{O: } 0.91 \cdot 2 + 0.47 \cdot 1 + 4.27 \cdot 11.78 \cdot 2 = 2y_4 \rightarrow y_4 = 51.44$$

**Resulta la ecuación de combustión completa del bagazo:**



**Masas de productos de combustión:**

De CO<sub>2</sub>: 3.83\*44 = 168.52 kg.

De Vapor de agua: 3.17\*18 = 57.06 kg.

De N<sub>2</sub>: 189.19\*28 = 5,297.32 kg.

De Oxígeno libre: 51.44\*32 = 1,646.08 kg.

**Ratios de gases, de la combustión completa:**

**Dióxido de carbono – combustible:**

$$R_{\text{CO}_2-cble} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{cble}}} = \frac{168.52}{100} = 1.685 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg cble}}$$

**Vapor de agua – combustible:**

$$R_{\text{H}_2\text{O}-cble} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{cble}}} = \frac{57.06}{100} = 0.5706 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg cble}}$$

**Nitrógeno – combustible:**

$$R_{N_2-cble} = \frac{m_{N_2}}{m_{cble}} = \frac{5,297.32}{100} = 52.97 \frac{\text{kg } N_2}{\text{kg } cble}$$

**Oxígeno libre- combustible:**

$$R_{O_2-cble} = \frac{m_{O_2}}{m_{cble}} = \frac{1,646.08}{100} = 16.46 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } cble}$$

Reducción de flujos de gases de combustión, por mejora energética en caldera.

**Se emplea la ecuación de flujo másico en función de las relaciones gases - combustible:**

$$\Delta m_{\text{gases}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = R_{\text{Gases-cble}} \left( \frac{\text{kg} - \text{gases}}{\text{kg} - \text{cble}} \right) * \Delta m_{\text{cble}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$\Delta m_{\text{gases}}$ : reducción de emisión de gases, kg/h

$\Delta m_{\text{cble}}$ : reducción de consumo de combustible: 8,071 kg /h kg/h

**Reducción de emanación de Dióxido de carbono a la atmósfera**

$$m_{CO_2} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 1.685 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg } cble} * 8,071 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 13,599.635 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

**Reducción de emanación de vapor de agua a la atmósfera:**

$$m_{H_2O} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 0.5706 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } cble} * 8,071 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 4,605.31 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

**Reducción de emisión de Nitrógeno libre a la atmósfera:**

$$m_{N_2} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 52.97 \frac{\text{kg } N_2}{\text{kg } cble} * 8,071 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 427,520.87 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

**Reducción de emisión de Oxígeno libre a la atmósfera:**

$$m_{O_2} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 16.46 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } cble} * 8,071 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 132,848.66 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se observa que hay un impacto positivo medio ambiental, con las mejoras energéticas en la caldera N° 20, reflejado en reducción de emisión de gases a la atmósfera.

## **IV. DISCUSIÓN**

La auditoría térmica se realizó aplicando el método indirecto, la caldera de tubos de agua y dos domos, el superior y el inferior, con circulación natural. El PCI del bagazo se determinó con los datos de planta, con la ecuación de Hugot, que es la más aceptada; y tiene en cuenta el impacto de la humedad residual, así como del azúcar residual, es decir, es dependiente del trabajo de los molinos de caña.

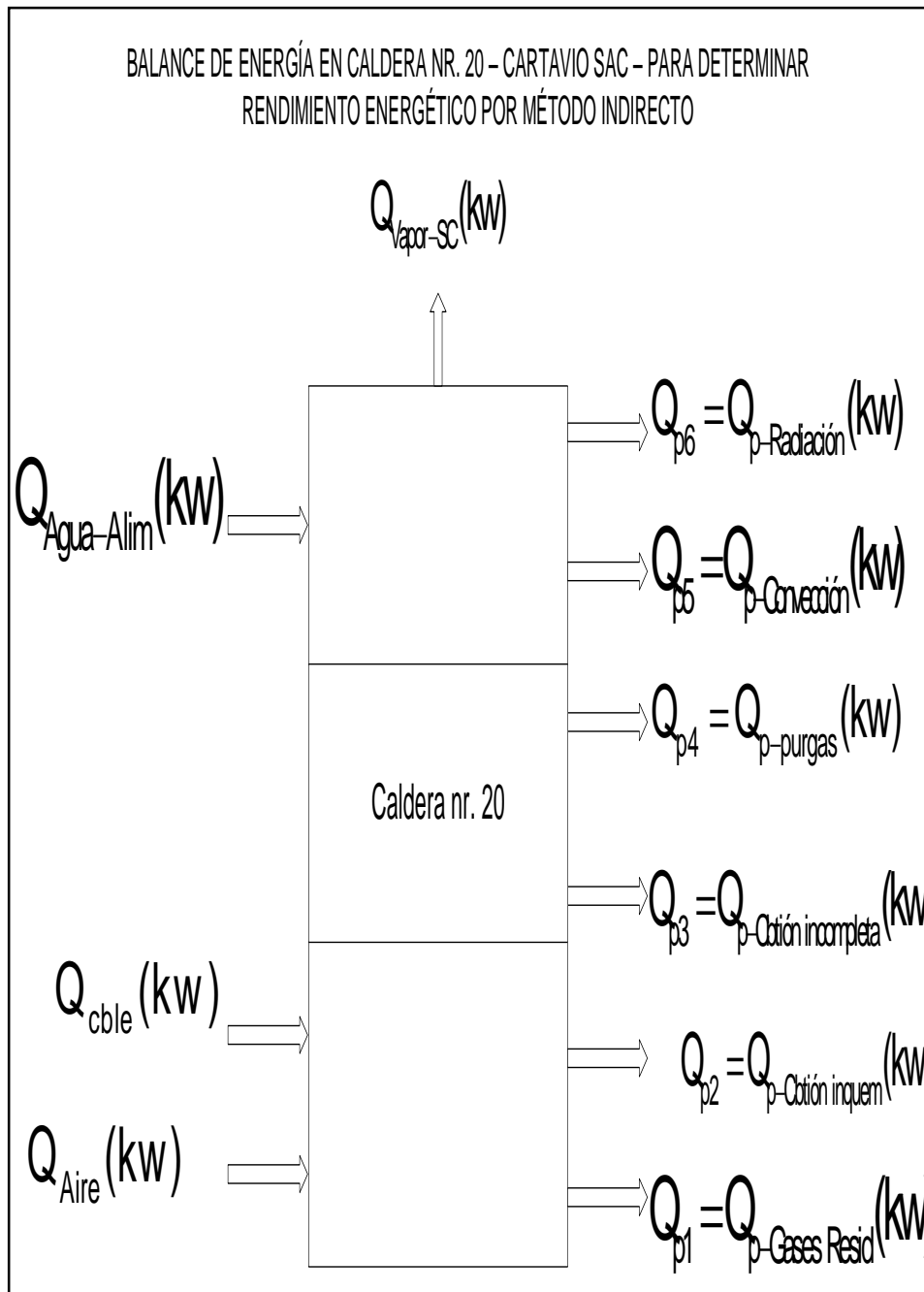
Se debe señalar que, actualmente existe una ecuación australiana, para determinar el PCI del bagazo, que tiene en cuenta, además de la humedad y azúcar residual, del contenido de cenizas, de la materia extraña formada por hojas, tierra, arena, que acompañan a la caña al ingenio azucarero. Se considera que esta ecuación da un valor más real que el de la de Hugot, sobre todo para caña cosechada a mano y que no tiene procesos de lavado.

El flujo promedio continuo de vapor de la caldera fue de 105 toneladas / hora. Este es medido con flujómetro del tipo de presión diferencial, sin embargo, se halló que el instrumento no es calibrado anualmente, como señala la norma metrológica, por lo que es necesario su calibración. Es el resultado de medir El vapor sobrecalentado diseñado. Presión y temperatura fueron 43 kg / cm<sup>2</sup>.y 420 ° C respectivamente, siendo valores promedio aritmético de una serie de más de 30 valores, tomados de las fichas de registros de mediciones en Planta.

La relación aire combustible para la caldera nr. 20 Es de 6.91 kg de aire por cada kg de bagazo, en este caso para mantener una temperatura en el hogar de 850 °C, se observó que la misma varía en margen relativamente amplio, alcanzado valores de 90 °C y de 800 °C, pero la inyección de aire es constante, indicando que se debe analizar la conveniencia de mejorar el manejo de la combustión, para mantener la eficiencia, así como la duración de los ladrillos refractarios que forman el hogar.

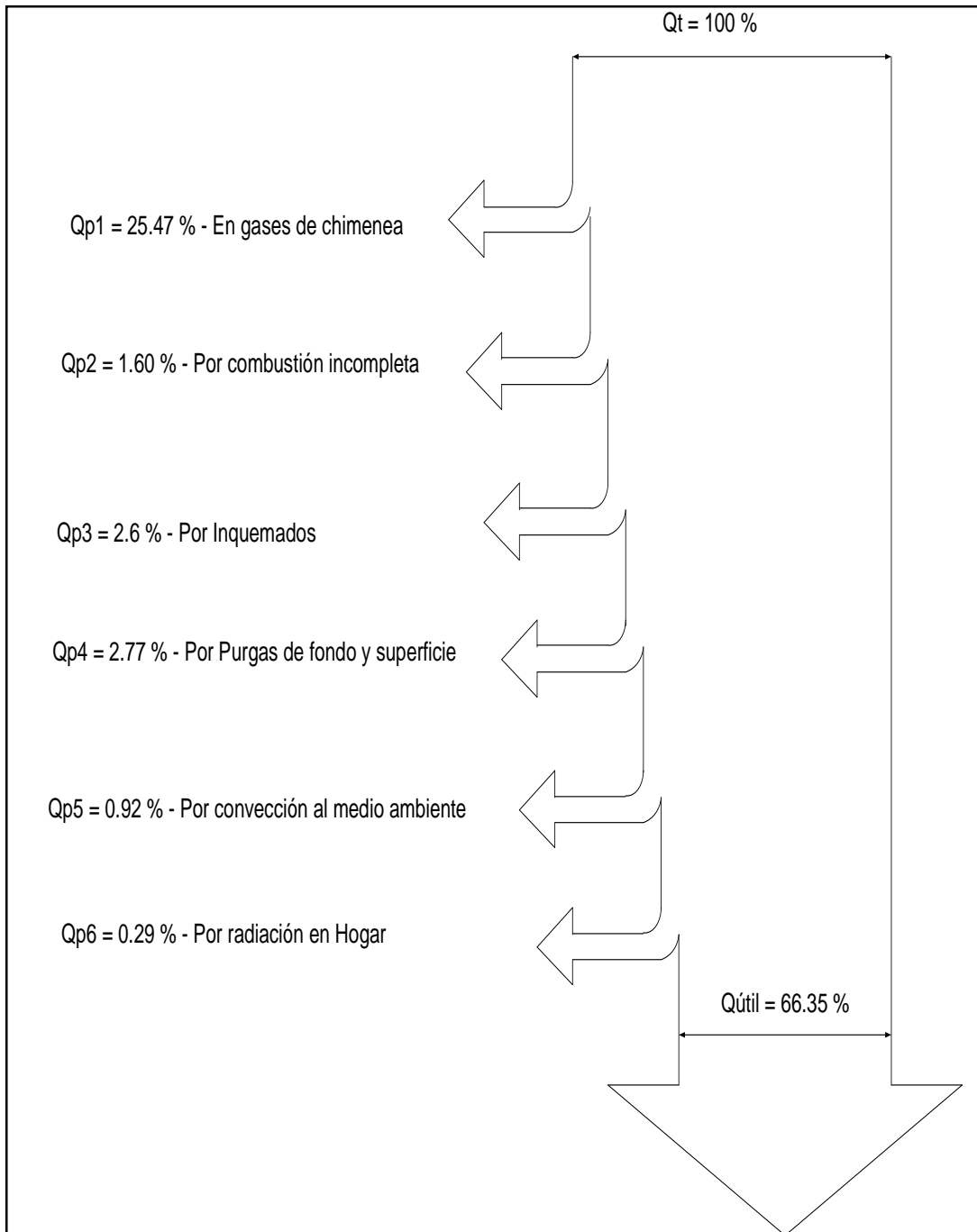
Al determinar las pérdidas de calor en caldera, se pudo determinar la eficiencia de la misma, la actual, siendo de 66.35 %, siendo un valor bajo, habida cuenta que una caldera a bagazo puede alcanzar valores de hasta 75%, la principal pérdida variable de calor en la caldera nr. 20 es la del calor sensible en los gases de chimenea, que emanan de la caldera a 178°C en promedio, representando el 25.47 % del calor total que ingresa, es demasiado, en otras calderas esta pérdida alcanza solamente entre el 16 a 18% del calor total.

Las carencias de calor en caldera se presentan en el siguiente cuadro:



El rendimiento térmico de la caldera nr. 20 difiere en 2.15 % del valor dado por el personal de Cartavio, que es de 64.2 %, que es un método empírico, en base a coeficientes constantes, que sirven solamente como referencia.

La distribución de los flujos energéticos, sus pérdidas que permiten determinar la eficiencia en un período de tiempo se presentan en el diagrama de Sankey adjunto:



De la ecuación del rendimiento de la caldera, por el método indirecto, se deduce que la variable más importante a manejar es el Poder Calorífico Inferior del bagazo, es decir, mejorar el trabajo en molinos, y en la limpieza de la caña, pues causa desgaste

y ensuciamiento en los tubos del economizador, y del pre calentador de aire, principalmente, reduciendo la transferencia de calor, actualmente se está atacando el efecto, por medio de limpieza y cambios de tubos, se debe atacar la causa de la reducción de transferencia de calor y de la vida útil, y esto se hace, primero con mejor limpieza de caña y luego, con mejor trabajo en molinos.

La variable más difícil de medir fue la del flujo de gases, la que se hizo por un método indirecto, determinando el flujo de gases, sabiendo el flujo de bagazo, y la temperatura y propiedades termo físicas de los gases residuales, no se cuenta con medidor de flujo en gases de chimenea, en Planta mencionan que instalaron hace unos años, un medidor de flujo volumétrico con sensor del tipo tubos de Pitot Prandtl, que genera una presión diferencial, pero, debido a las impurezas en los gases de chimenea colapsaba luego de dos a tres días de ser limpiado, además que inmediatamente daba señales erróneas, por reducción del pase de los gases residuales.

En ese sentido se plantea instalar un flujómetro del tipo Venturi, con sensor compensador de temperatura, fácil de mantener y calibrar, para tener mayor precisión y confiabilidad en las mediciones.

## **V. CONCLUSIONES**



Se hizo el balance de masa y energía en caldera nr. 20, con las fichas de medición de variables de proceso en Planta Cartavio:

- Capacidad nominal de generación de vapor: 120,000 kg/h = mv-n
- Capacidad promedio de generación de vapor, en operación: 105,000 kg/h
- Presión absoluta del vapor generado: 43 bar
- Temperatura del vapor generado: 420 °C
- Entalpía del vapor generado: 3,256.30 kJ/kg = hv
- Temperatura del agua de suministro a caldera: 110 °C
- Entalpía del agua a caldera: 462 kJ/kg = hag-alim
- Combustible quemado en caldera: bagazo de caña de azúcar
- Poder Calorífico Inferior del bagazo: 7235 kJ/kg = PCIbgzo
- Rendimiento térmico promedio: 64.20 % =  $\eta_{cald}$
- Temperatura de gases de combustión en hogar = 850 °C
- Calor específico del gas caliente en el hogar = 1.29 kJ/(kg\*°C)
- Entalpía del gas caliente del hogar: 1096.50 kJ/kg = hgc
- Temperatura del aire fresco: 178 °C
- Calor específico del aire fresco: 1.17 kJ/(kg\*°C)
- Entalpía del aire fresco: 208.26 kJ/kg = hai

La relación aire combustible en caldera, Ra-cble resultó ser 6.91 kg aire/kg bagazo, siendo el flujo de bagazo promedio de 52687 kg/h, bastante significativo, de 52.687 ton/h.

La carga térmica total de la caldera es de 128,264.7 kw y la carga útil de 82,345.93 kw, siendo el flujo térmico total perdido de 45,918.77 kw.

**Aplicando el método indirecto se determinaron, en primer lugar, las pérdidas específicas en caldera:**

- a) Por gases de chimenea: 32,676 kw = 25.47%Qt
- b) Pérdida por combustión incompleta del bagazo: 2053.35 kw = 1.60%Qt
- c) Pérdida de calor por inquemados: 3335.62 kw = 2.60 % Qt
- d) Carencia de calor por purgas en caldera: 3551.36 kw = 2.77 %Qt
- e) Carencia de calor por convección de pared exterior de caldera al medio ambiente:  
1,182.40 kW = 0.92 %
- f) Carencia de calor por radiación en caldera: 374.78 %

### **Eficiencia energética de la caldera en condiciones actuales, es 66.35 %**

Se hizo, también el análisis de eficiencia de caldera por método de Hugot

#### **Cálculo del poder calorífico del bagazo: 7235 kJ/kg.**

- Contenido de humedad del bagazo (w) = 51.22%
- Sacarosa en bagazo (s) = 3.0%

Se concluye que el PCI del bagazo tiene un bajo valor, pues la humedad debe ser de 48% y la sacarosa residual, de máximo 1.5 %

Eficiencia de la caldera sobre la base de temperatura de gases de combustión.

Durante el funcionamiento de la caldera, la temperatura de los gases residuales se mantuvo entre límites de 525 a 536 ° F (280 °C). El valor promedio de los gases de combustión se tomó como 530 ° F.

Calor sensible perdido en gases de la chimenea: 761.57 BTU/lb

Cantidad de calor que todavía está disponible después de las primeras tres pérdidas: 2119.91 BTU/lb.

Eficiencia de la caldera nr. 20: 64.87 %, es un valor cercano al determinado por el método indirecto, mayor en 1.7 %, sin embargo, se utilizan muchos coeficientes constantes.

Se concluye que la eficiencia de la caldera tiene un valor muy bajo, de 64.87% como valor máximo, debido a mala calidad del bagazo, mala preparación de la caña, deficiente mantenimiento y deficiencias operacionales.

Se preparar una propuesta técnico económica de mejora en caldera Nro. 20.

En base a la auditoría realizada a la caldera nr. 20, se determina una propuesta de mejoras, para ampliar la capacidad proyectada de generación de vapor, desde 105 hasta 120 Ton vapor/h.

Aumentar el rendimiento térmico proyectado de la caldera.

Mejorar el PCI del bagazo, la limpieza de caña, el mantenimiento y operación de la caldera.

En las condiciones consideradas, se tiene el rendimiento proyectado 73.67%, es decir un aumento de 9% en la eficiencia.

Se concluye que sí es posible establecer medidas técnicas para el aumento de la eficiencia actual en la caldera.

El flujo de bagazo con las mejoras proyectadas, será de 44,616 kg/h. Se concluye que, con las mejoras proyectadas a ser aplicadas, se obtendría una reducción del bagazo en calderas, del orden de:  $52,687 - 44,616 = 8,071$  kg /h.

Se hizo el análisis económico de la mejora energética.

Presupuesto de inversión: 660,655 soles

Beneficios económicos por aumento de rendimiento de eficiencia en caldera:

Beneficio neto anual: 3'938,648 – 349,650 = 3'588,998 soles/año

Tiempo de retorno de la inversión, PRI: 0.184 años = 2.2 meses.

Se concluye que, debido al intenso desgaste de las mazas de molinos de caña, y para sostener las mejoras, las inversiones en mejoras deben hacerse cada tres años, que es el período de vida ideal de mazas y tubos de calentadores de aire en calderas.

Masas de productos de combustión:

De CO<sub>2</sub>: 3.83\*44 = 168.52 kg, De Vapor de agua: 3.17\*18 = 57.06 kg

De N<sub>2</sub>: 189.19\*28 = 5,297.32 kg, De Oxígeno libre: 51.44\*32 = 1,646.08 kg

Ratios de gases, de la quema completa:

**Dióxido de carbono – combustible:**

$$R_{CO_2-cble} = \frac{m_{CO_2}}{m_{cble}} = \frac{168.52}{100} = 1.685 \frac{kg CO_2}{kg cble}$$

**Vapor de agua – combustible:**

$$R_{H_2O-cble} = \frac{m_{H_2O}}{m_{cble}} = \frac{57.06}{100} = 0.5706 \frac{kg H_2O}{kg cble}$$

**Nitrógeno – combustible:**

$$R_{N_2-cble} = \frac{m_{N_2}}{m_{cble}} = \frac{5,297.32}{100} = 52.97 \frac{kg N_2}{kg cble}$$

**Oxígeno libre- combustible:**

$$R_{O_2-cble} = \frac{m_{O_2}}{m_{cble}} = \frac{1,646.08}{100} = 16.46 \frac{kg O_2}{kg cble}$$

Reducción de flujos de gases de combustión, por mejora energética en caldera

Cm<sub>cble</sub>: reducción de consumo de combustible: 8,071 kg /h kg/h

Reducción de emanación de Dióxido de carbono a la atmósfera: 13599.635 kg/h

Reducción de emanación de vapor de agua a la atmósfera: 4,605.31 kg/h

Reducción de emisión de Nitrógeno libre a la atmósfera: 427,502.87 kg/h

Reducción de emisión de Oxígeno libre a la atmósfera: 132,848.66 kg/h

Se concluye que hay impacto positivo medio ambiental, con mejoras energéticas en caldera nr. 20, con reducción de emisión de gases a la atmósfera.

## **VI. RECOMENDACIONES.**

Instalar instrumentos de medida en los puntos adecuados para obtener mayor precisión. Estos instrumentos deben ser calibrados cada año.

Involucrar a la alta gerencia en la necesidad de invertir en adquisición de activos e insumos para mejorar el mantenimiento.

Realizar un estudio de mejora de limpieza de la caña, de preferencia neumático, para reducir la cantidad de impurezas desde 12 a 12 % en peso de caña, hasta un 4 a 5 % que se logra actualmente con tecnologías mejoradas, tendrá un impacto positivo, pues aumentará el PCI del bagazo y la vida útil de las mazas y componentes de la caldera.

Actualizar el sistema Scada de control automático, y que sus valores promedio sirvan para programar los períodos y plazos de mantenimiento preventivo a ser aplicado, en la práctica, un buen sistema de Scada de los procesos de la caldera, sirve como técnica de mantenimiento predictivo, pues permite establecer las capacidades, rendimientos y sus causas, para establecer las medidas a ser tomadas.

Es imprescindible capacitar al personal de operación de la caldera, pero también es muy importante que se le de los valores a mantener bajo control, de los parámetros que inciden directamente en la capacidad, rendimiento y costo del vapor.

Un aspecto importante es el sistema de mantenimiento de las mazas de los molinos de caña, luego de mejorar la limpieza y reducir las impurezas y los efectos de desgaste por erosión y abrasión, principalmente, debe establecerse una vida útil razonable de las mismas, así como un programa de mantenimiento que permita su recuperación a tiempo y efectiva, con soldadura adecuada y poder sostener las mejoras.

## **REFERENCIAS**

- ALDERETES, Carlos. Calderas a bagazo, Proyecto, Operación y Mantenimiento. Edición del Autor. Primera Edición: Buenos Aires, 2016.
- ANGELERI Eduardo: La combustión del bagazo. Revista Ingeniería e Industria, junio de 1996, pp.99-106. Buenos Aires, Argentina.
- BALOH T & Wittwer E.- Manual de Energía para Ingenios Azucareros. Verlag. Dr. Albert Bartens, Berlín 1995.
- CASTRO Mora Javier–Operación y mantenimiento de calderas. Edit. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2002.
- FERNÁNDEZ Humberto et al: Efectos del tamaño de partículas y la humedad sobre la combustión del bagazo de caña en un horno de lecho fijo. Revista Ion, 2013, 26(2): 73-85 – Bucamaranga, Colombia.
- PISA Jorge et al: Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar. Revista CET, 2004. Publicación de la Universidad Nacional de Tucumán.
- TARDILLO H. Guillermo: Auditoria energética. Proyecto libro digital, Primera edición. PLD 0536, Lima, Perú, 2012.
- VALERO A.& Guallar J.- Análisis exergético de una planta azucarera. Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, España – 1989.
- AZAÑERO Lujan, Juan Mario - CONTRERAS Monzón, Richard. Viabilidad técnico económica del uso de residuos en la cosecha en verde de la planta de caña de azúcar para una caldera bagacera de la empresa agroindustrial Laredo SAA. Tesis (Ingeniero Mecánico). Trujillo, Perú, Universidad César Vallejo Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2011. 162 p.
- PÉREZ Velásquez Roland - HARO Vásquez Albert. Efecto del flujo de aire-combustible en la eficiencia y economía de una caldera bagacera mediante un sistema de control de la combustión. Tesis (Ingeniero Mecánico). Trujillo, Perú, Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de ingeniería mecánica, 2011. 162 p.
- RODAS Flores, Edinson Alexander - VARGAS MACHUCA Palacios, César Andrés. Estudio comparativo de la eficiencia térmica de la caldera bagacera n°4 en funcionamiento convencional y con inyector secundario de aire caliente en la empresa agroindustrial Pomalca SAA. Tesis (Ingeniero Mecánico Electricista). Pimentel, Perú, Facultad de ingeniería, arquitectura y urbanismo, Escuela académico profesional de ingeniería mecánica eléctrica, 2016. 123 p.
- CUSTODIO Rodríguez, Juan Carlos, SOLÍS Pérez, Enzo Paulino. Valoración del proceso de recuperación de purgas de fondo y de nivel de las calderas piro tubulares

- en la empresa pesquera Austral Group s.a.a. – Coishco. Tesis (Ingeniero de energía). Nuevo Chimbote – Perú 2017. 131 p.
- GIL Unday Zuleiqui. Estudio del impacto ambiental del uso del Bagazo como fuente de energía en Centrales de ingenios en Cuba. Estudio de Caso Melanio Hernández. Tesis (Ingeniero Mecánico). Universidad de Girona, Girona; Cuba 2005. 142 p.
  - RIOS Martínez Diana Mercedes. Diseño y montaje para la implementación del sistema de recolección en Seco y manejo de ceniza en el hogar de las calderas de bagazo, del Ingenio la unión, S.A. Tesis. Guatemala, Universidad de Alan Carlos de Guatemala Facultad de ingeniería, Guatemala, septiembre de 2011. 133 p.

### **Artículos científicos.**

GALVEZ Vidaurre, Carlos. Utilización del desincrustante magnético (DM) para optimizar la calidad del agua en calderas. Revista Ingeniería Industrial No. 28, 2010, ISSN 1025-9929, pp 139-154, Perú.

D'ANGELO, Juan; PAZ, Dora; CÁRDENAS, Gerónimo J. Probabilidades del secado de bagazo en los ingenios azucareros de México. Revista: Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, vol. 2, núm. 2, 2006, pp. 41-46.

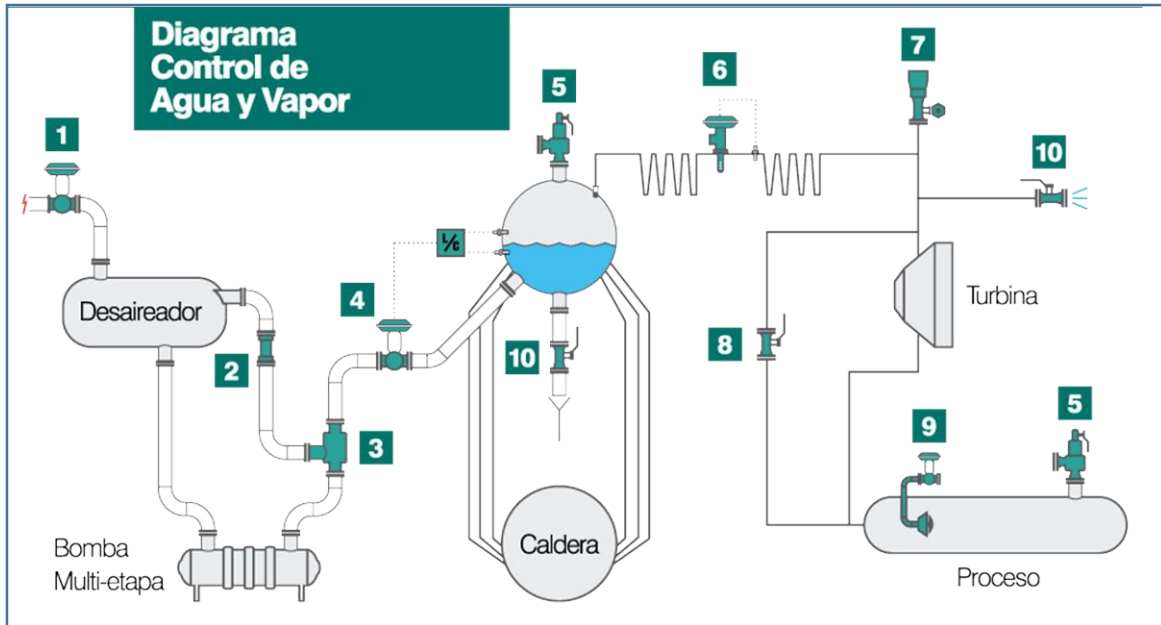
NÚÑEZ Bosch, Osvaldo; OLIVA Ruiz, Luis; TORRES Céspedes, Gretchen; PARÚAS Cuza, Rafael; ALMARALES Arceo, Ángel. Estudio teórico en calderas bagaceras retal cv-45-18 trabajando con petróleo cubano emulsionado. Revista Tecnología Química, vol. XXV, núm. 3, septiembre-diciembre, 2005, pp. 34-40.

CRUZ M., Carolina, Federico J. FRANCK Colombres, Marcos A. GOLATO, Walter D. MORALES y Dora PAZ. Mejora de la eficiencia de calderas bagaceras de presiones altas en la Argentina, usando secado de bagazo. Rev. Ind. Y Agríc. De Tucumán. Tomo 90 (2): 7-16; 2013, ISSN 0370-5404.

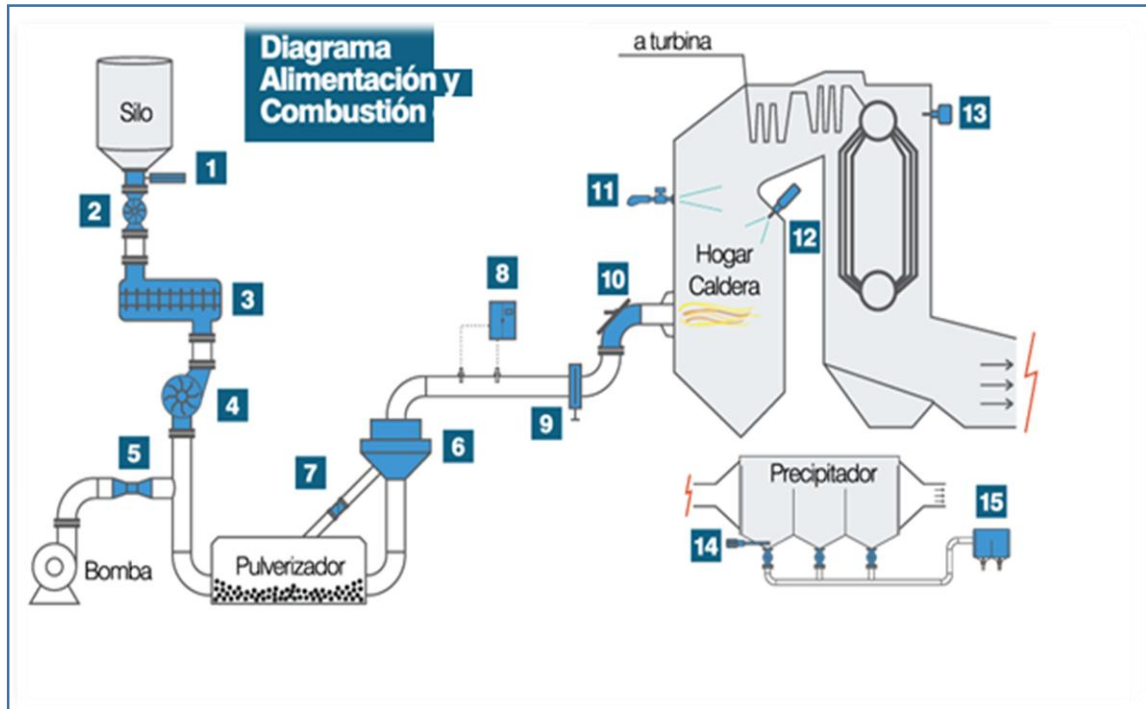


## **ANEXOS**

**Anexo 1: Diagrama de control de flujo de agua alimentación y control de flujo de vapor sobrecalentado de la caldera N° 20 Cartavio S.A.A.**



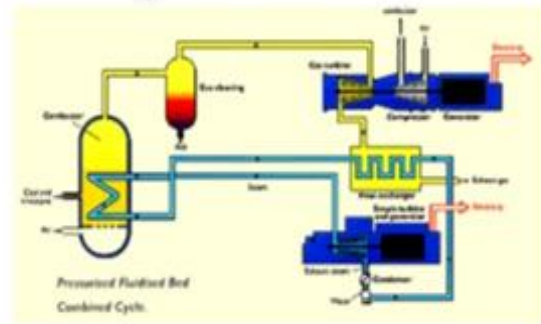
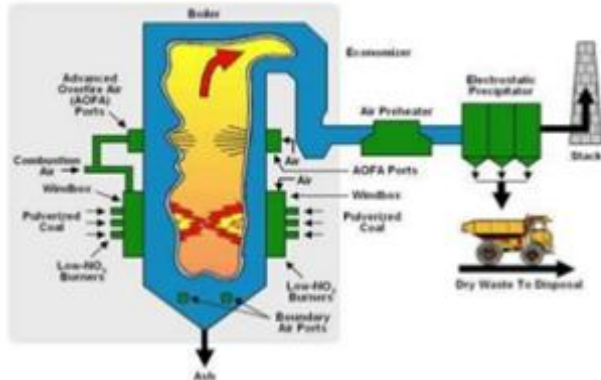
**Anexo 2: Diagrama de alimentación de combustible al hogar y combustión dentro de la caldera.**



**Anexo 3: Diagrama del proceso de combustión dentro del hogar, generación de la energía, lavador de gases de la caldera N°20 Cartavio S.A.A.**

• **Combustión.**

- Termodinámica y cinética de la combustión.
- Procesos de combustión.
  - Lecho fijo.
  - Lecho fluidizado.
  - Quemadores pulverizado.
- Generación de electricidad.
- Aspectos ambientales.  
Tecnologías limpias para el control de emisiones y aprovechamiento eficiente de la energía.



**Anexo 4: Tabla del poder calorífico de diferentes materiales (combustibles).**

<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>PODER C. MEDIO K.J/KG</b>
<b>Bagazo húmedo</b>	10500
<b>Bagazo seco</b>	19200
<b>Cascara de cacahuete</b>	17800
<b>Cascarilla de arroz</b>	13800
<b>Celulosa</b>	16500
<b>Corteza escurrida</b>	5900
<b>Cosechas de caña</b>	4600
<b>Madera seca</b>	19000
<b>Madera Verde(*)</b>	14400
<b>Paja seca de trigo</b>	12500
<b>Paja seca de cebada</b>	13400
<b>Aserrín húmedo</b>	8400
<b>Viruta Seca</b>	13400
	<b>P.C. SUPERIOR K.J/KG</b>
<b>Cascara de almendras</b>	36800
<b>Cascara de nueces</b>	32000
<b>Cascara de arroz</b>	15300
<b>Cascara de pepa de girasol</b>	17500
<b>Cascara de trigo</b>	15800
<b>Corteza de pino</b>	20400
<b>Corcho</b>	20930
<b>Orujillo de aceituna</b>	17900
<b>Orujo de uva</b>	19126
<b>Papel</b>	17500
<b>Jara (8%humedad)</b>	18900(P.C.I.)

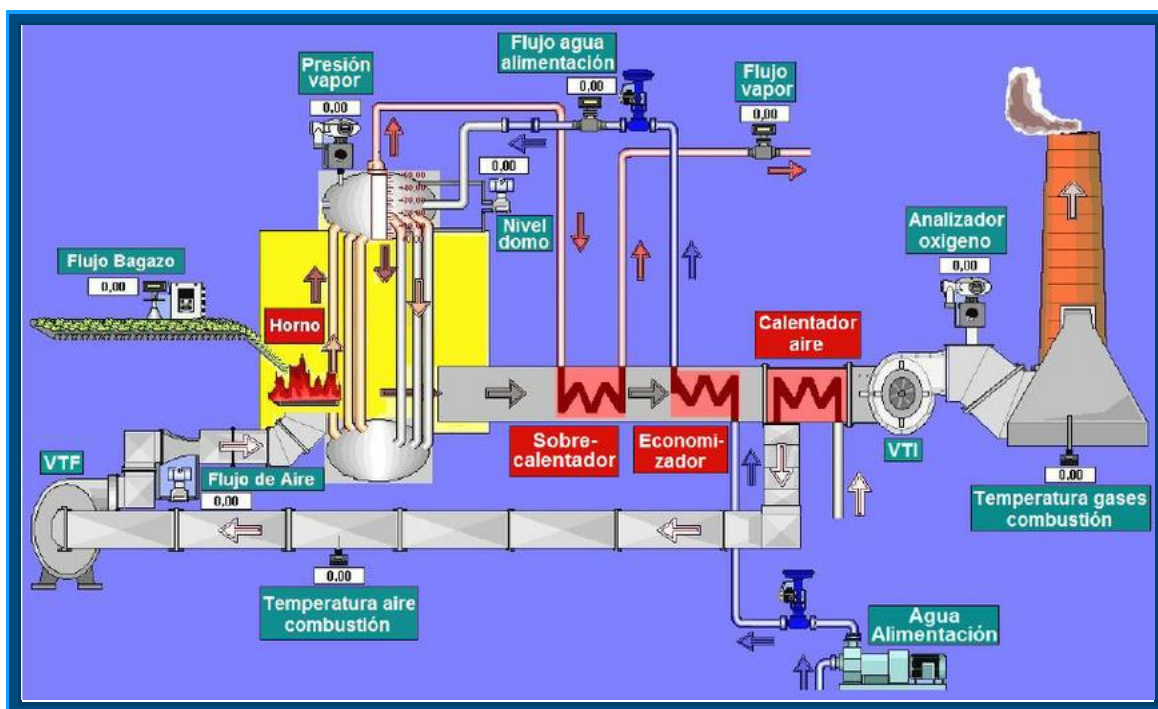
**Anexo 5: Tabla de las características de las biomásas de los combustibles sólidos.**

	<b>Madera</b>	<b>Carbón</b>	<b>Bagazo</b>
<b>Análisis próximo (%)</b>			
Humedad	12.03	7.87	16.03
Cenizas	2.82	11.99	5.41
Carbono	46.62	74.00	43.48
Hidrogeno	5.73	2.33	5.10
Nitrógeno	0.20	0.40	0.85
Azufre	0.08	0.23	0.10
Oxigeno	32.52	3.18	29.03
<b>Análisis Elemental (%)</b>			
Humedad	12.03	7.87	16.03
Materia Volátil	70.65	17.20	69.71
Cenizas	2.82	11.99	5.41
Carbón Fijo	14.50	62.94	8.85
Poder calorífico(BTU/LB)	7024	11136	6999
Azufre	0.08	0.23	0.10

**Anexo 6: Tablas de la composición química y densidad de los granos del bagazo.**

Composición Química	Origen del Bagazo de los gránulos		
	Cuba(6mm)	Brasil(6mm)	Brasil(12mm)
C	46,9	47,0	47,2
N	0,18	0,21	0,24
H	5,49	5,98	5,77
O	47,4	46,8	46,8
Humedad	16,3	6,7	6,6
Ceniza	1,7	5,5	5,5
Densidad(kg/m3)	1030-1150	1100-1260	1030-1090

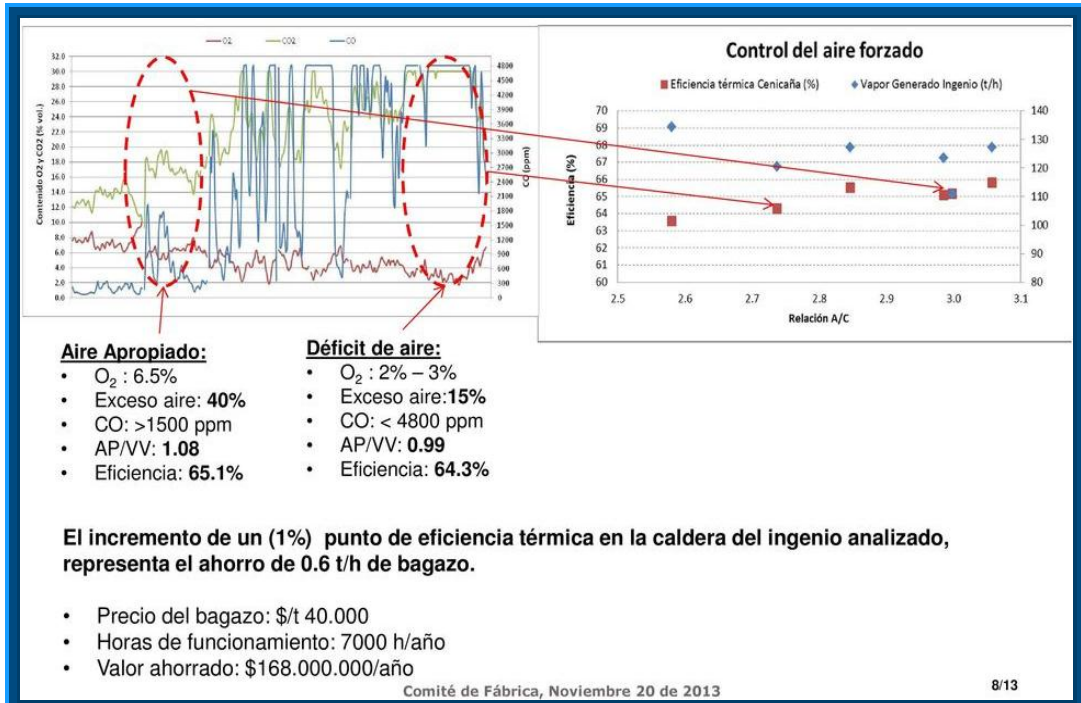
**Anexo 7: Representación general del proceso de generación de vapor.**



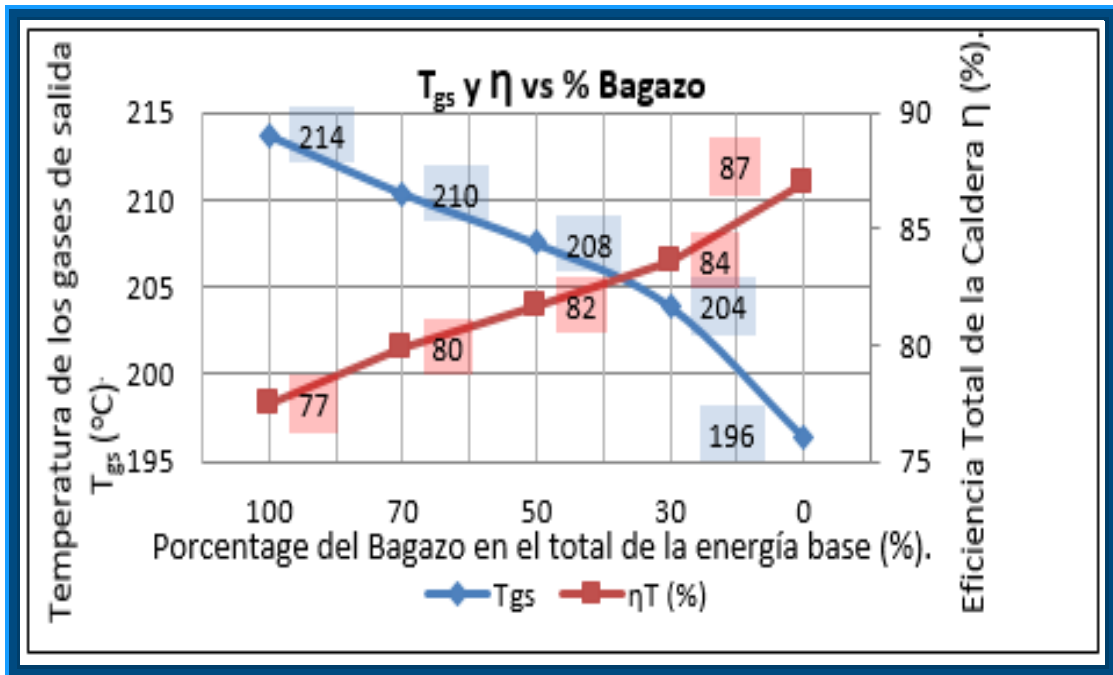
## Anexo 8: Representación exterior de la caldera N°20 de Cartavio SAA.



## Anexo 9: Mezcla no apropiada de aire y combustible en la combustión.



### Anexo 10: Temperatura de los gases y eficiencia de la caldera.



### Anexo 11: Evaluación de la eficiencia de la caldera.

## EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CALDERAS

**Método Indirecto**

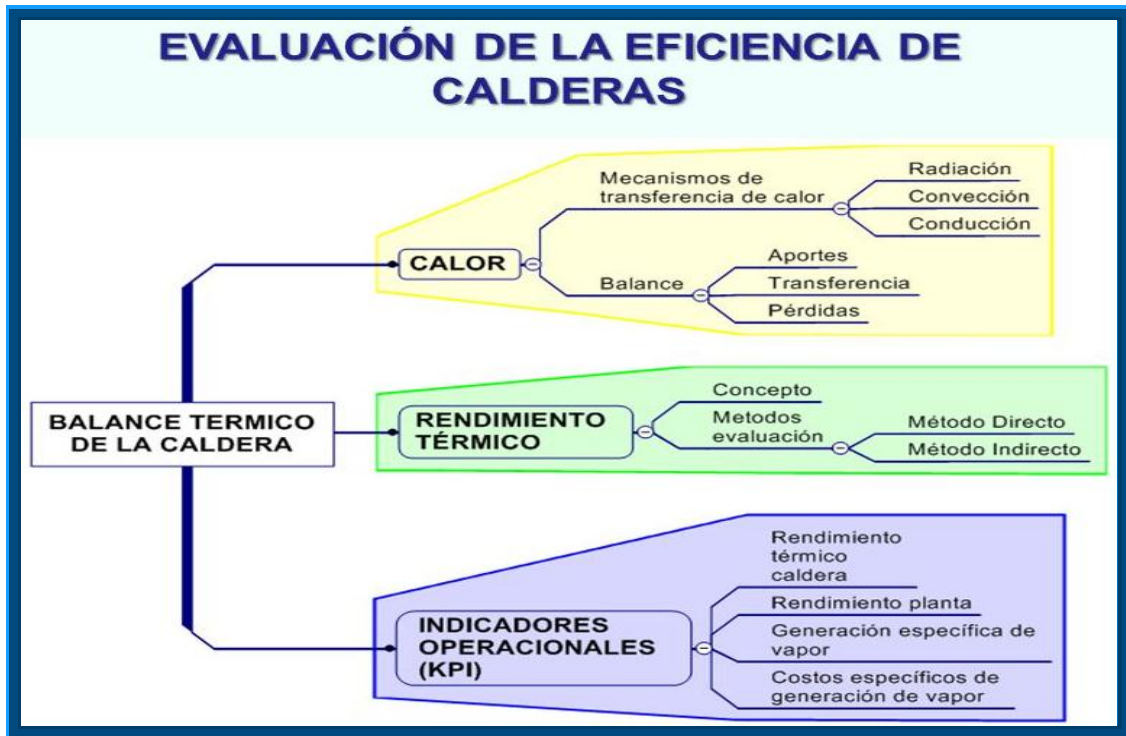
$$\text{Eficiencia térmica} = 1 - (\text{Pérdidas} / \text{Calor entrada})$$

$$\text{Eficiencia térmica} = 100 - \text{Porcentaje de Pérdidas}$$

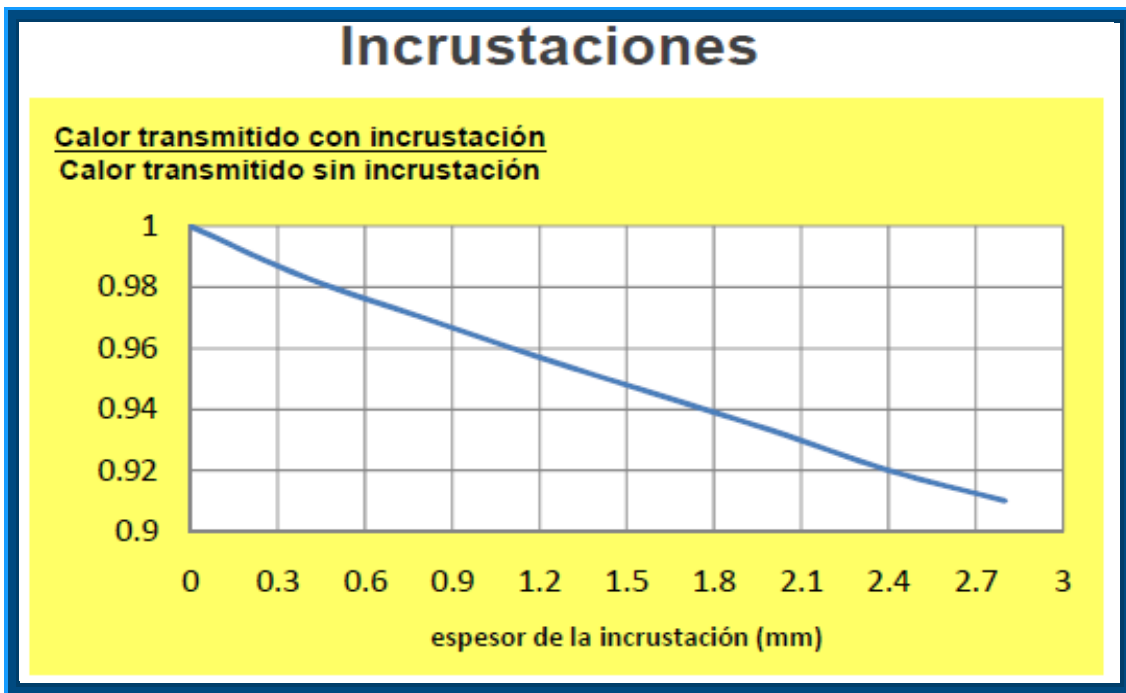
- Pérdida de calor por gases secos.
- Pérdida de calor por humedad del combustible.
- Pérdida de calor por Hidrógeno en el combustible.
- Pérdida de calor debida a CO en gases de escape.
- Pérdida de calor por combustible en cenizas.
- Pérdida de calor por radiación.

Efficiency = 100 - (1+2+3+4+5+6+7+8) (by In Direct Method)

Anexo 12: Evaluación de la eficiencia de las calderas acuotubulares.

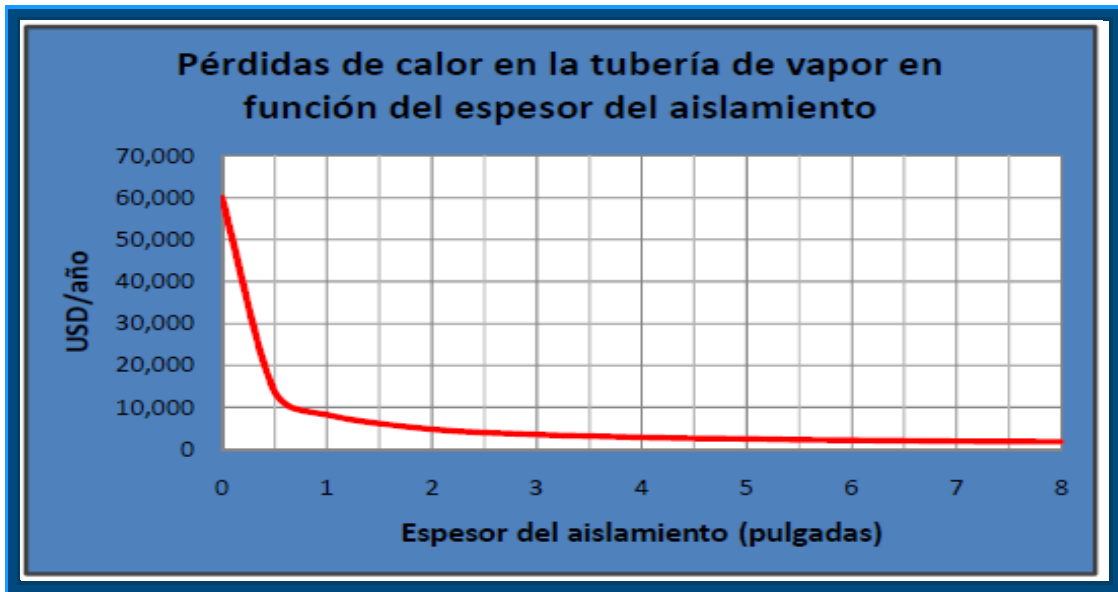


Anexo 13: Incrustación de solidos con respecto al espesor del tubo.

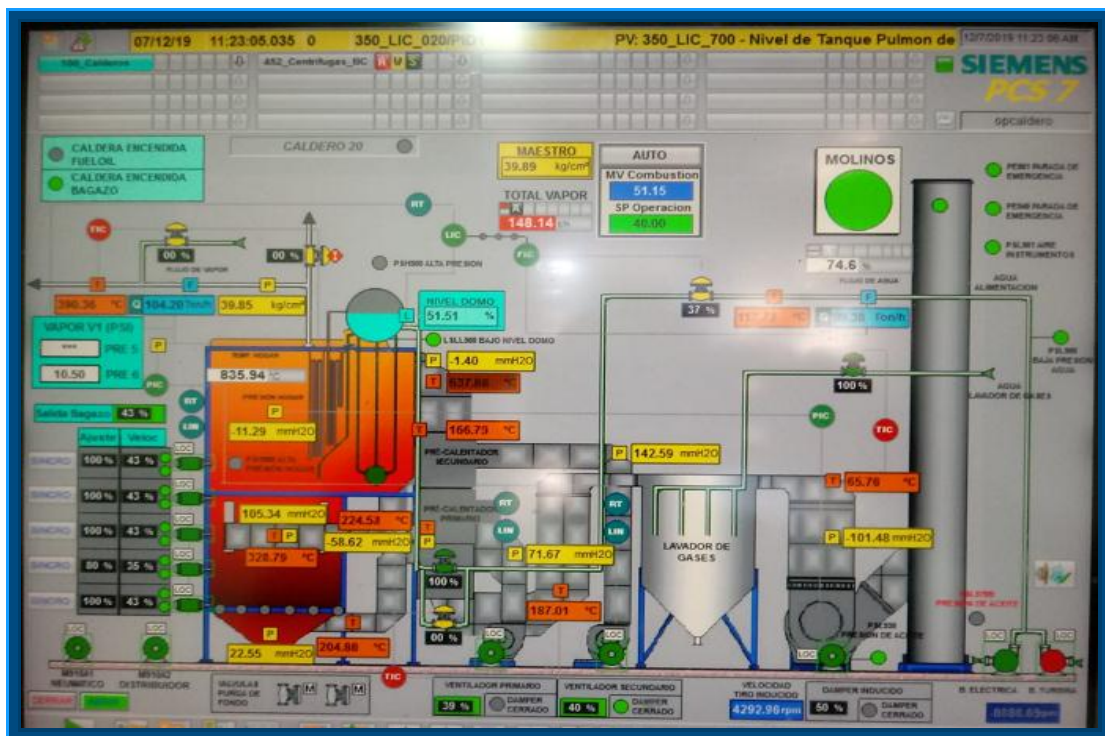




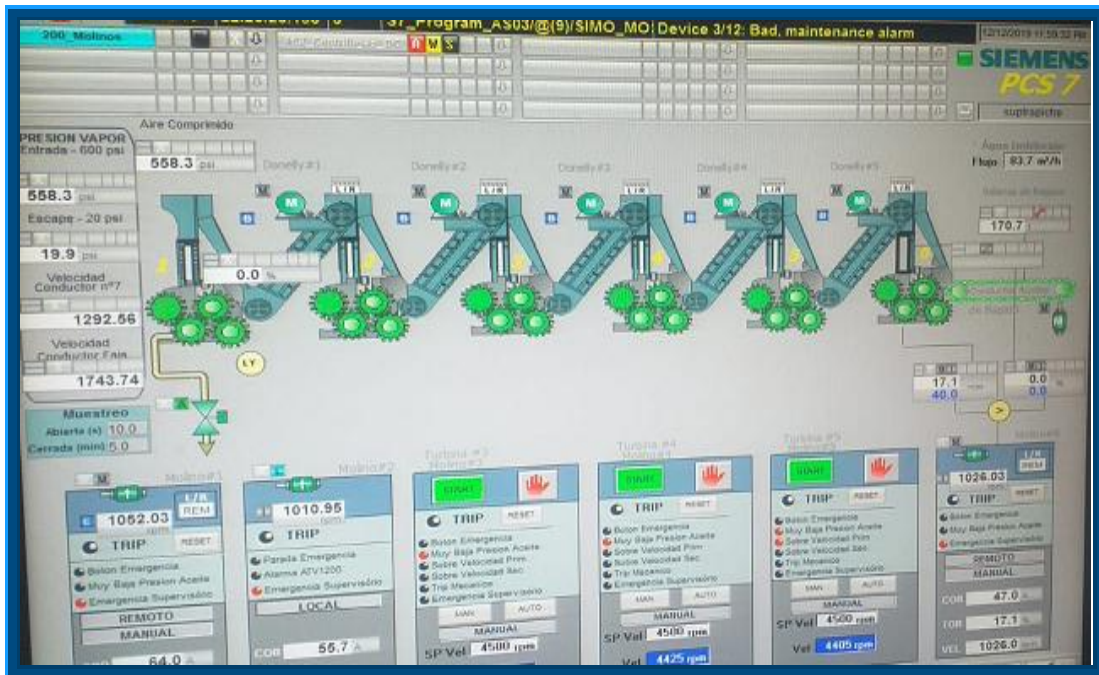
**Anexo 14: Perdida de calor en las tuberías en función al espesor del aislamiento térmico.**



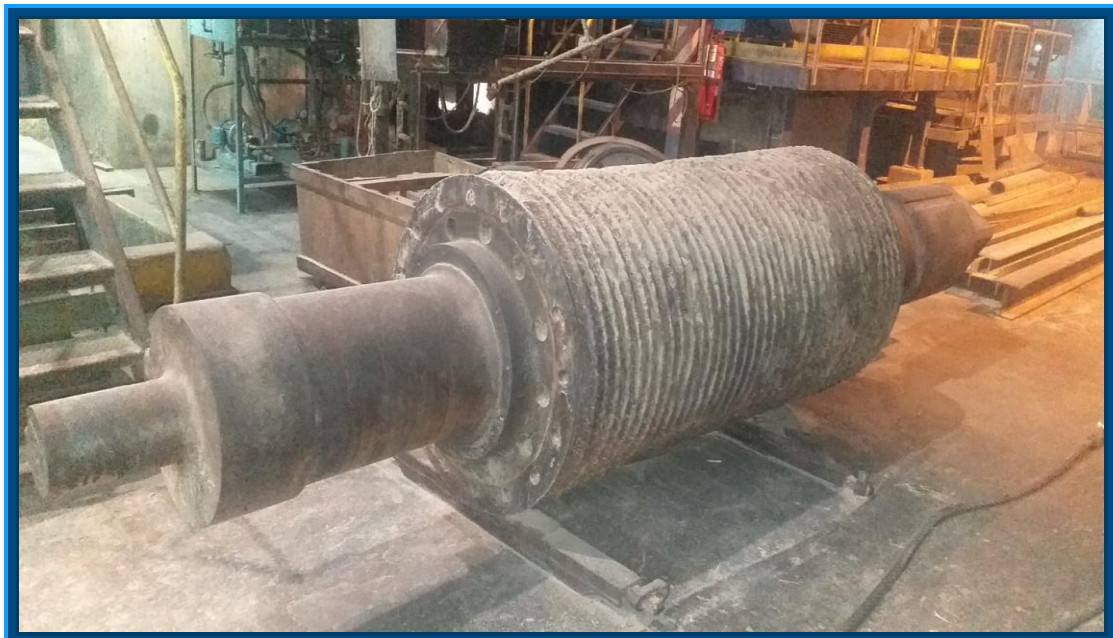
**Anexo 15: Pantalla HDMI de control de la caldera N°20 Cartavio S.A.A.**



**Anexo 16: Pantalla HDMI de control de los molinos de trapiche de Cartavio S.A.A.**



**Anexo 17: Antes de la recuperación de la maza (desgaste total).**



**Anexo 18: Durante la recuperación de la maza (aplicación de soldadura eléctrica).**



**Anexo 19: Después de la recuperación de la maza (listo para entrar en servicio).**



**Anexo 20: Toma de datos, sala de control de planta de fuerza Cartavio S.A.A.**



**Anexo 21: Toma de datos, Cartavio SAA.**



**Anexo 22: Sub-estación y sala de control del caldero N° 20, Cartavio S.A.A.**



**Anexo 23: Sub-estación y sala de control del caldero N° 20, Cartavio S.A.A.**



### Anexo 24: Fichas de instrumento de evaluación.

Instrumentos de evaluación nr.1: Medición y procesamiento de datos Caldera nro. 20					
Proceso:	Generación de vapor sobrecalentado				
Empresa:	Agroindustrial Cartavio SAC				
Autores:	Valverde Ramos, Leonel; Guevara Ramos, Marvin Ricardo				
Ítem	Flujo vapor	Presión vapor	Temperatura vapor	Fecha	Observaciones
	kg/h	bar	°C	21/11/2019	
1	102,325	42.25	420.5	21/11/2019	
2	106,250	42.15	417.5	21/11/2019	
3	106,320	41.75	418.6	21/11/2019	
4	105,610	41.8	419.65	21/11/2019	
5	105,715	41.9	419.28	21/11/2019	
6	105,630	41.65	417.35	21/11/2019	
7	105,410	41.25	420.6	21/11/2019	
8	104,962	41	420.8	21/11/2019	
9	104,850	41	420.74	21/11/2019	
10	105,050	41.1	419.25	21/11/2019	
11	105,610	41.6	419.8	21/11/2019	
12	105,635	41.2	419.85	21/11/2019	
13	105,745	41.3	420.2	21/11/2019	
14	102,975	41.15	420.2	21/11/2019	
15	106,520	41.6	420.7	21/11/2019	
16	106,740	40.85	420.15	21/11/2019	
17	106,320	40.75	420.05	21/11/2019	
18	104,625	40.62	420	21/11/2019	
19	104,925	40.35	419.65	21/11/2019	
20	104,987	40.14	419.85	21/11/2019	
21	105,115	40.25	420.2	21/11/2019	
22	105,425	41.1	420.3	21/11/2019	
23	105,230	41.15	419.95	21/11/2019	
24	105,200	41.05	419.25	21/11/2019	
Parámetros estadísticos descriptivos					
Denominación		Flujo vapor	Presión vapor	Temperatura vapor	
		kg/h	bar	°C	
Media aritmética		105,299	41	420	
Mediana		105,418	41	420	
Moda		106,320	41	420	
Rango		(102,325; 106,740)	(40; 42)	(417;421)	
Desviación estándar		994.2314015	0.56062594	0.89524468	

**Anexo 25: Validación de instrumentos de recolección de datos.**

**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO**

ÍTEM	CRITERIOS A EVALUAR						Observaciones (si debe eliminarse o modificarse un ítem por favor indique)	
	Pertinencia <sup>1</sup>		Relevancia <sup>2</sup>		Claridad <sup>3</sup>			
	Sí	No	Sí	No	Sí	No		
1	✓		✓		✓			
2	✓		✓		✓			
3	✓		✓		✓			
4	✓		✓		✓			
<b>Aspectos Generales</b>					Sí	No		
El instrumento contiene instrucciones claras y precisas para responder el cuestionario.					✓			
Los ítems permiten el logro del objetivo de la investigación.					✓			
El número de ítems es suficiente para recoger la información. En caso de ser negativa su respuesta, sugiera los ítems a añadir.					✓			
<b>VALIDEZ</b>								
APLICABLE				✓	NO APLICABLE			
<b>APLICA ATENDIENDO A LAS OBSERVACIONES</b>								

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado de la variable y/o dimensión.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar el indicador de la dimensión y la variable.

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

**DATOS GENERALES DEL EXPERTO**

Apellidos y nombres : *LUJÁN SILVA MANUEL EMILIO*

Profesión : *ING. MECANICO*

Especialidad : *GENERACIÓN ENERGÍA*

  
 -----  
 Manuel Emilio Luján Silva  
 ING. MECANICO  
 R. CIP N° 180477

**Firma del experto**

**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO**

ÍTEM	CRITERIOS A EVALUAR						Observaciones (si debe eliminarse o modificarse un ítem por favor indique)	
	Pertinencia <sup>1</sup>		Relevancia <sup>2</sup>		Claridad <sup>3</sup>			
	Sí	No	Sí	No	Sí	No		
1	✓		✓		✓			
2	✓		✓		✓			
3	✓		✓		✓			
4	✓		✓		✓			
<b>Aspectos Generales</b>					<b>Sí</b>	<b>No</b>		
El instrumento contiene instrucciones claras y precisas para responder el cuestionario.					✓			
Los ítems permiten el logro del objetivo de la investigación.					✓			
El número de ítems es suficiente para recoger la información. En caso de ser negativa su respuesta, sugiera los ítems a añadir.					✓			
<b>VALIDEZ</b>								
APLICABLE				✓	NO APLICABLE			
<b>APLICA ATENDIENDO A LAS OBSERVACIONES</b>								

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado de la variable y/o dimensión.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar el indicador de la dimensión y la variable.

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

**DATOS GENERALES DEL EXPERTO**

Apellidos y nombres : *CABELLOS VILLALOBOS EDUARDO JAIME.*

Profesión : *ING. MECANICO*

Especialidad : *GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ENERGIA.*

  
**Firma del experto**

Eduardo J. Cabellos Villalobos  
ING. MECANICO  
C. C. 81888



**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO**

ÍTEM	CRITERIOS A EVALUAR						Observaciones (si debe eliminarse o modificarse un ítem por favor indique)
	Pertinencia <sup>1</sup>		Relevancia <sup>2</sup>		Claridad <sup>3</sup>		
	Sí	No	Sí	No	Sí	No	
1	✓		✓		✓		
2	✓		✓		✓		
3	✓		✓		✓		
4	✓		✓		✓		
<b>Aspectos Generales</b>					<b>Sí</b>	<b>No</b>	
El instrumento contiene instrucciones claras y precisas para responder el cuestionario.					✓		
Los ítems permiten el logro del objetivo de la investigación.					✓		
El número de ítems es suficiente para recoger la información. En caso de ser negativa su respuesta, sugiera los ítems a añadir.					✓		
<b>VALIDEZ</b>							
APLICABLE				✓	NO APLICABLE		
<b>APLICA ATENDIENDO A LAS OBSERVACIONES</b>							

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado de la variable y/o dimensión.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar el indicador de la dimensión y la variable.

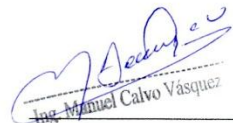
<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

**DATOS GENERALES DEL EXPERTO**

Apellidos y nombres : *CDLVO VASQUEZ MANUEL*

Profesión : *ING. MECANICO*

Especialidad : *GENERACION DE VAPOR.*



**Firma del experto**

*RCIP: 180478*

## Anexo 26: Ficha de Control de asesorías de la Tesis.

### INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN NR.2: HOJA DE ENCUESTA.

**Encuestados:** Personal de operación de caldera N° 20.

**Fecha:** 17/10/2019

**Empresa:** Agroindustrial Cartavio S.A.A.

1. ¿Considera que la Caldera N° 20 trabaja con buena eficiencia ?

a) Sí      b) No (X): El bagazo está muy húmedo y tiene mucha suciedad.

2. ¿Considera que al aumentar la eficiencia de la caldera N° 20 se reduce el consumo de combustible?

a) Sí (X): Debido a reducción de pérdidas y menor humedad del bagazo b) No

3. ¿Considera importante la implementación de planes de gestión energética en el sistema de generación de vapor de Agroindustrial Cartavio?

a) Sí(X)      b) No

4. ¿Sabe de áreas o equipos de importancia crítica, en donde es necesario mejorar el sistema térmico de generación de vapor en Planta Agroindustrial Cartavio S.A.A?

a) Sí(X)      b) No

5) ¿Ha recibido adiestramiento en eficiencia energética, generación de vapor en el último año?

a) Sí      b) No(X)

6) ¿Considera que se realiza un óptimo mantenimiento preventivo en todo los componentes del sistema de generación vapor en Caldera N° 20?

a) Sí      b) No(X)

7) ¿Ha participado en pruebas de seguridad en caldera N°20 de Agroindustrial Cartavio?

a) Sí      b) No(X)

8) ¿Tiene conocimiento de realización de auditorías energética a la caldera N° 20 de Agroindustrial Cartavio SAA.?

a) Sí      b) No(X)