

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DEL SISTEMA DE VAPOR DEL INGENIO AZUCARERO DEL NORTE

ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL SISTEMA DE VAPOR DEL INGENIO AZUCARERO DEL NORTE

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

FRANKLIN ISMAEL CHICAIZA RODRIGUEZ

franklin.chicaiza@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. José Luis Palacios Encalada, Ph.D.

jose.palacios@epn.edu.ec

DMQ, marzo 2022

CERTIFICACIONES

Yo, FRANKLIN ISMAEL CHICAIZA RODRIGUEZ declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

FRANKLIN ISMAEL CHICAIZA RODRIGUEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por FRANKLIN ISMAEL CHICAIZA RODRIGUEZ, bajo mi supervisión.

**ING. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA, Ph.D.
DIRECTOR**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

FRANKLIN ISMAEL CHICAIZA RODRIGUEZ

ING. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA, Ph.D.

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mis padres, Franklin y María Elena, por nunca dejarme sólo en este largo camino. Por la esperanza y la fuerza que su amor me transmite.

A mis hermanos Juan y Pedro por ser mis amigos, mis compañeros y mi inspiración.

A Victoria, mi abuelita que me mira y me sonrío desde el cielo.

A Darío y Rosa, por ser mis segundos padres y porque siempre desearon verme en el final de esta etapa.

A toda mi familia por su ejemplo de unión y lucha.

Y para Arianna, por estar al inicio y al final, por su apoyo, por su amor incondicional y por la luz que me dan sus ojos día a día.

FRANKLIN ISMAEL CHICAIZA

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios y a mi familia por ser un apoyo incondicional en cada paso de mi vida universitaria y aún más en esta última etapa.

Expresamos un agradecimiento muy sincero a todo el personal de mantenimiento del Ingenio Azucarero del Norte, especialmente al Ing. Álvaro Enríquez, al Ing. Jaime Teca y al Sr. Washington Carcelén. Cada uno compartió sus experiencias y conocimientos con gran actitud y simpatía para la realización de este trabajo.

Nuestro agradecimiento sincero al Ing. José Luís Palacios Encalada por su brillante tutela, sus consejos profesionales y su excelente desempeño como profesional en la Escuela Politécnica Nacional.

Al laboratorio de transferencia de calor a cargo del distinguido Ing. Christian Tapia.

A mis amigos Jason y Andrés por el apoyo y la amistad verdadera que me han enseñado.

Y a todas las personas que formaron parte en la realización de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Eficiencia exergetica	3
1.4.2 Breve reseña histórica de la empresa.....	4
1.4.3 Descripción general de procesos para la elaboración de productos derivados de la caña de azúcar.....	5
1.4.3.1 Recepción de caña	6
1.4.3.2 Molienda.....	6
1.4.3.3 Clarificación.....	8
1.4.3.4 Evaporación.....	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Reconocimiento de caldera en la empresa	12
2.1.1 Caldera Dallas.....	12
2.2 Estudio del funcionamiento del sistema de vapor	16
2.2.1 Tratamiento y acondicionamiento de agua.....	16
2.2.1.1 Sistema de purgas.....	17
2.2.1.2 Condensados.....	17
2.2.2 Combustión.....	18
2.2.3 Requisitos de mantenimiento.....	19
2.3 Identificación de la línea base	19
2.4 Recopilación histórica de datos.....	21
2.4.1 Parámetros de la generación de vapor	21
2.5 DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA EN LA LINEA BASE.....	24
2.6 IDENTIFICACION DE OPORTUNIDADES DE AHORRO ENERGÉTICO ..	29
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31
3.2.1.1 Caldera Dallas.....	32

3.2.1.2	Turbogenerador.....	32
3.2.1.3	Atemperador.....	33
3.2.2	Análisis tecno económico.....	34
3.2.3	Control de flujo de agua del atemperador y optimización de recolección de revaporizado.....	35
2.2	Conclusiones.....	39
2.3	Recomendaciones.....	40
3	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
4	ANEXOS.....	43
	ANEXO I. Proceso de producción de productos derivados de la caña de azúcar	43
	ANEXO II. Diagrama línea base.....	44
	ANEXO III. Diagrama de distribución del vapor.....	45
	ANEXO IV. Registro de parámetros de la caldera.....	46

RESUMEN

El presente proyecto tiene la finalidad de realizar un Análisis Energético y Exergético del Sistema de Vapor del Ingenio Azucarero del Norte.

La optimización de los recursos energéticos en un ingenio azucarero es de gran importancia para aumentar la productividad y reducir costos de producción y energía, por ello se ha realizado un análisis energético a través de las bases teóricas de la primera y segunda ley de la termodinámica. El sistema de vapor está comprendido por una caldera que produce vapor distribuido directamente a un turbogenerador, el flujo con menor energía proveniente de este se distribuye a la fábrica y es usado en la producción de azúcar.

A través de la información recolectada se proponen oportunidades de ahorro energético para la empresa, además de un análisis tecno económico de cada una de estas para comprobar su rentabilidad.

El Ingenio Azucarero del Norte es pionero de la industria azucarera en el norte del país, con un sistema de vapor utilizado para la producción de energía. Este proyecto es una recopilación de información con resultados favorables para la empresa.

Además, se presentan los procesos más importantes en la producción de azúcar sulfatada, haciendo énfasis en las máquinas que hacen uso del vapor producido en la caldera. Se realiza un reconocimiento y un levantamiento de información de la caldera de la empresa con el fin de estudiarla.

La metodología usada en el proyecto está basada en los lineamientos de la norma ISO50002. En este punto se realiza el análisis de energía y exergía en la línea base del sistema de vapor. Posteriormente se proponen las oportunidades de ahorro energético con su respectivo análisis tecno económico. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

PALABRAS CLAVE: energía, exergía, línea base, sistema de vapor.

ABSTRACT

The purpose of this project is to perform an Energetic and Exergetic Analysis of the Steam System of the Ingenio Azucarero del Norte Sugar Mill.

The optimization of energy resources in a sugar mill is of great importance to increase productivity and reduce production and energy costs, therefore an energy analysis has been carried out through the theoretical bases of the first and second law of thermodynamics. The steam system is comprised of a boiler that produces steam distributed directly to a turbogenerator, the flow with less energy coming from this is distributed to the factory and is used in the production of sugar.

Through the information collected, energy saving opportunities are proposed for the company, in addition to a techno-economic analysis of each one of them to verify their profitability.

Ingenio Azucarero del Norte is a pioneer in the sugar industry in the north of the country, with a steam system used for energy production. This project is a compilation of information with favorable results for the company.

In addition, the most important processes in the production of sulfated sugar are presented, with emphasis on the machines that make use of the steam produced in the boiler. A reconnaissance and information survey of the company's boiler is carried out in order to study it.

The methodology used in the project is based on the guidelines of the ISO50002 standard. At this point, the energy and exergy analysis of the steam system baseline is performed. Subsequently, energy saving opportunities are proposed with their respective techno-economic analysis. Finally, conclusions and recommendations are presented.

KEYWORDS: energy, exergy, baseline, steam system.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En la mayoría de las plantas industriales, el uso del vapor es la fuerza motriz que ayuda a lograr la transformación de las materias primas o semielaborados en productos terminados con valor agregado. A pesar de la enorme importancia que representa, el tema del vapor en nuestro medio aun no alcanza toda la dimensión que su papel preponderante le confiere como nervio-motor de los distintos procesos productivos (Escamilla, 2007).

El Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM) es una compañía azucarera que radica en la provincia de Imbabura y fue fundada en 1964. En sus inicios el ingenio contaba con una caldera con la capacidad de generar 25 t/h de vapor. En la actualidad esta se encuentra en desuso, y en la actualidad, se utiliza una caldera ensamblada por la compañía DALLAS BOILER MEXICANA con una capacidad de generación de vapor de 28 t/h. La caldera DALLAS no trabaja a su máxima capacidad debido a diversos factores que ocurren durante el proceso de producción de vapor.

Actualmente la industria azucarera es considerada como uno de los procesos de producción más dificultoso y dinámico (Escamilla, 2007). La caña de azúcar es la materia prima de donde se extrae la máxima cantidad de sacarosa con el fin de recuperar y transformar cristales a través de flujos de calor que interactúan con la misma. El bagazo es un subproducto de la caña de azúcar y se utiliza como combustible en un ciclo de cogeneración de energía en donde los flujos de vapor (con diferentes presiones) son distribuidos en todo el proceso de producción.

Se realizará un análisis energético y exergético para conocer el rendimiento actual del sistema de vapor aplicando los principios de termodinámica y transferencia de calor. El resultado es una solución viable de ahorro de energía que mejora la eficiencia del sistema de vapor en porcentaje, con el fin de ahorrar combustible y reducir las emisiones. Del mismo modo, se harán correcciones en cada proceso localizando pérdidas y anomalías de los diferentes elementos que conllevan al uso ineficiente de la energía térmica. Mediante la implementación de medidas tecno-económicas se validará la viabilidad de la aplicación de las posibles soluciones de ahorro para optimizar su consumo.

Una gestión integral de energía permite mantener el control de los parámetros relacionados con el proceso de fabricación. En un ingenio azucarero la importancia de una buena gestión energética subyace en las posibles mejoras y capacidad de expansión, teniendo en cuenta el consumo energético. Un método distinto para realizar análisis en un sistema energético es la exergía la cual se basa en la segunda ley de la termodinámica, este método pretende incrementar la eficiencia en procesos industriales. Además de incorporar los métodos tradicionales energéticos para el análisis de balance de energía, el método exergético trata la

degradación de la calidad de la energía en un volumen de control que no se tratan en los otros métodos (Lozano, 1987).

Una auditoria energética es realizada normalmente a través de 2 métodos con el fin de obtener y analizar el rendimiento del sistema de vapor, el método directo y método indirecto. La primera toma en cuenta la energía útil en relación con la energía proporcionada por el combustible. Para el método indirecto se compara mediante la resta de las pérdidas individuales del sistema de vapor con la energía ingresada correspondiente al combustible. El incremento del rendimiento del sistema de vapor consistirá en producir energía térmica con menor combustible debido a soluciones que aprovechen de manera eficiente el uso de la energía térmica (Arjona, 2019).

El proyecto se regirá de los lineamientos de la normativa ISO-50002; se recolectará información importante de la industria, especificaciones técnicas de los diferentes equipos consumidores de vapor como de combustible y así mismos datos de operación de trabajo por medio de instrumentación adecuada. Del mismo modo se utilizará como precedentes trabajos de titulación y cualquier tipo de información confiable sobre auditorías energéticas y exergéticas en el sistema de vapor de industrias afines.

La implementación del análisis energético y exergético brindara soluciones y beneficios a la empresa debido a la representación cuantificada del rendimiento del sistema de vapor proporcionada por el mismo. Además, un estudio sobre la optimización del sistema de vapor incluyendo un análisis tecno-económico donde la industria tendrá una mejor visión sobre la inversión de las posibles soluciones de ahorro de energía que puedan generar mayores utilidades a la empresa.

1.1 Objetivo general

Realizar un análisis energético y exergético del sistema de vapor del Ingenio Azucarero del Norte.

1.2 Objetivos específicos

1. Recolectar datos técnicos sobre el proceso de generación de vapor.
2. Describir los procesos que utilizan vapor en la industria azucarera.
3. Conocer la eficiencia que presentan la caldera, el turbogenerador y el atemperador a través de la primera y segunda ley de termodinámica.
4. Reconocer mediante un diagrama a los elementos que compone la línea base, además de su distribución y sus condiciones de operación.
5. Optimizar el proceso de transformación de energía en el sistema de vapor a través de la implementación de la segunda ley de la termodinámica.

6. Plantear correcciones que la empresa podría aplicar para el ahorro de energía.
7. Determinar la viabilidad económica de las correcciones sugeridas, mediante un análisis tecno-económico.

1.3 Alcance

El análisis energético y exergético fundamentado en la norma ISO-50002 brindará soluciones de ahorro energético económicamente viables para la empresa. Para cumplir con este alcance se realizará una recolección de información tanto teórica como práctica del sistema de vapor.

Las soluciones de ahorro estarán basadas en el análisis planteado con respecto al sistema de vapor, no se tomará en cuenta la distribución de vapor por las ramificaciones secundarias que tienen que ver con la evaporación del jugo de caña, regeneradores, tachos, etc. Es decir, sólo se tomará en cuenta a la línea base: la producción de vapor en la caldera, la entrada de vapor al turbogenerador y su salida hacia un reductor de temperatura (atemperador), la entrada hacia el pre-evaporador (principal evaporador de jugos) y finalmente el retorno de condensados hacia la caldera. Puesto que los demás componentes utilizan el vapor que sale de la evaporación del agua del jugo de caña y sus condensados se destinan a varios lugares; en el mejor de los casos (cuando el pH del condensado es el adecuado) es retornado a la caldera, pero gran parte es usado como agua de imbibición y el resto es desechado.

Se brindará las opciones de mejora a la empresa, sin embargo, esta última se encargará de su implementación si esta la considera adecuada.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Eficiencia exergética

Las máquinas térmicas tienen la finalidad de producir trabajo al suministrar calor a un fluido (puede ser gas o líquido). Considerando el calor proporcionado y el trabajo generado por la máquina se definirá su eficiencia como se indica en la ecuación 1 (Cengel, 2012).

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Salida de trabajo neto}}{\text{Entrada de calor total}}$$

Ecuación 1. Eficiencia térmica.

La eficiencia térmica demuestra la calidad del proceso de conversión de energía para la producción de trabajo, por lo tanto, su diseño estará basado en mejorar el proceso de

transformación del calor en trabajo. Una maquina térmica con una buena eficiencia será capaz de generar la mayor cantidad de trabajo con poco combustible. Mientras más grande sea la eficiencia menor será la contaminación al ambiente, se aumentará la productividad y se reducirán los costos por combustible. Sin embargo, los valores para eficiencias de máquinas térmicas son relativamente bajos, por ejemplo, el motor a gasolina posee una eficiencia del 25 % lo que significa que una cuarta parte del total de la energía química del combustible se transforma en trabajo (Cengel, 2012). Las eficiencias más altas las tendremos en centrales eléctricas que funcionan con turbinas de gas o vapor con un valor cercano al 60%. Debido a que no se aprovecha el 100 % de la energía, gran parte de esta es desechada hacia sumideros como ríos, lagos o la atmosfera (Cengel, 2012).

La eficiencia térmica está definida en base a la conservación de la energía, es decir a la primera ley de la termodinámica. En un balance de energía, todo lo que entra (calor) debe salir en forma de trabajo o de desechos a un sumidero de menor temperatura. La eficiencia de primera Ley puede ser errónea y no demostrar la verdadera calidad de la energía aprovechada (Cengel, 2012). Esto se ve reflejado si consideramos dos máquinas con la misma eficiencia térmica, pero con distintas temperaturas tanto de sus fuentes como la de sus sumideros, estas temperaturas nos brindaran información de que es lo que realmente está sucediendo con el potencial energético aprovechado. Por este motivo es necesario considerar una eficiencia de segunda Ley para poder considerar las irreversibilidades que se distinguen en un proceso termodinámico de conversión de energía en trabajo (Cengel, 2012)

Se define la eficiencia de segunda ley o eficiencia exergética, como la relación entre el trabajo útil y del máximo generado por la máquina térmica (Cengel, 2012).

$$\varepsilon = \frac{W_u}{W_{rev}}$$

Ecuación 2. Eficiencia exergética.

En la Ecuación 2 (Cengel, 2012) se encuentra la expresión más sencilla para calcular una eficiencia de segunda Ley y puede ser útil para cualquier tipo de maquina térmica: turbinas, bombas, generadores de vapor, etc. Sin embargo, el trabajo útil y el trabajo reversible dependen de las propiedades de los fluidos de entrada y salida, de su combustible y de las condiciones ambientales a las que están expuestos. Para este proyecto, se han definido varias ecuaciones que se usaran en el análisis exergético de la línea base del sistema de vapor. Cada una de estas está basada en la Ecuación 3 con la diferencia de que se toman en cuenta todas las propiedades de entradas y salidas para cada elemento analizado.

1.4.2 Breve reseña histórica de la empresa

Los orígenes de la primera industria azucarera en la provincia de Imbabura datan de 1908, considerando las excelentes condiciones climáticas de la zona que permiten un mejor cultivo de caña de azúcar. No es hasta el año de 1964 cuando las Cajas de Previsión Social deciden construir un Ingenio Azucarero en la zona mediante la contratación de las compañías FIVES LILLE CAIL y Granda Centeno.

La obra es terminada en el año 1966 y es vendida a la compañía TAINA, sin embargo, esta al no poder cumplir los compromisos adquiridos con el IESS, es embargada y transferida a manos de depositarios judiciales. En 1985 se forma la Empresa de Economía Mixta Ingenio Azucarero del Norte, constituida con el aporte del IESS, cañicultores de Imbabura y Carchi, accionistas privados y trabajadores de la compañía (IANCEM, 2019).

El Ingenio constituye la empresa Agroindustrial más importante de Imbabura y Carchi, con proveedores, y programas de cultivo de 4 600 hectáreas de caña de azúcar. Está ubicada en la Panamericana Norte km 25 Vía a Tulcán km. 25 Ibarra; Imbabura (Zambonino, 2013).

1.4.3 Descripción general de procesos para la elaboración de productos derivados de la caña de azúcar

El principal producto elaborado por la empresa es la azúcar sulfatada, obteniendo un aproximado de 600 000 sacos al año. Los turnos de trabajo en la planta son rotativos y de 24 horas al día durante 320 días que dura la zafra. El consumo de agua proviene del río Chota en una cantidad de 100 metros cúbicos al día.

Durante el proceso de producción del azúcar se obtienen subproductos derivados del proceso principal, como son: bagazo, cachaza y melaza. La cachaza y cierta parte del bagazo son vendidos a agricultores de la zona que usan los productos como abono y comida para ganado. La cachaza como abono orgánico es rica en fósforo, calcio, nitrógeno y baja en potasio, fuente importante de zinc, boro y desde luego de materia orgánica.

La mayor parte del bagazo producido sirve como combustible en la zona de generación de energía (Zambonino, 2013).

Ya que la producción de vapor es de vital importancia para todo el proceso de producción y dado que este trabajo confiere su principal atención a la generación y distribución de vapor, se tiene la necesidad de describir detalladamente el proceso de producción de azúcar sulfatada. Dentro de las etapas del proceso se incluyen la producción de los subproductos descritos anteriormente.

En el ANEXO I, se resume todo el proceso de producción de productos derivados de la caña de azúcar. Cada uno de los procesos expuestos en este grafico serán explicados con detalle.

1.4.3.1 Recepción de caña

En primer lugar, la caña de azúcar llega a la empresa de diferentes zonas de plantación de la provincia. La caña es transportada en camiones con capacidad de carga de 15 toneladas en promedio. Antes de llegar al patio, los camiones pasan por el laboratorio de campo donde una tractor sonda realiza un muestreo cada 8 horas de trabajo, mediante este muestreo se determinan parámetros característicos de la caña que servirán para determinar la calidad de la caña. La caña transportada en los camiones es descargada en el patio con la ayuda de una grúa como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Recepción de la caña en los patios de la empresa (Fuente: Propia).

1.4.3.2 Molienda

La caña es transportada desde los patios hacia la mesa de alimentación (Figura 2), una representación más clara del mecanismo se observa en la Figura 3a. La función principal de la mesa de alimentación es transportar la caña hacia las cuchillas giratorias (Figura 3b) que cortan la caña para luego pasar a un segundo juego de cuchillas denominado desfibradora, en esta última, la caña de azúcar sale en forma de fibra de donde se va a extraer el jugo en el proceso de molienda.



Figura 2. Mesa de alimentación (Fuente: Propia)

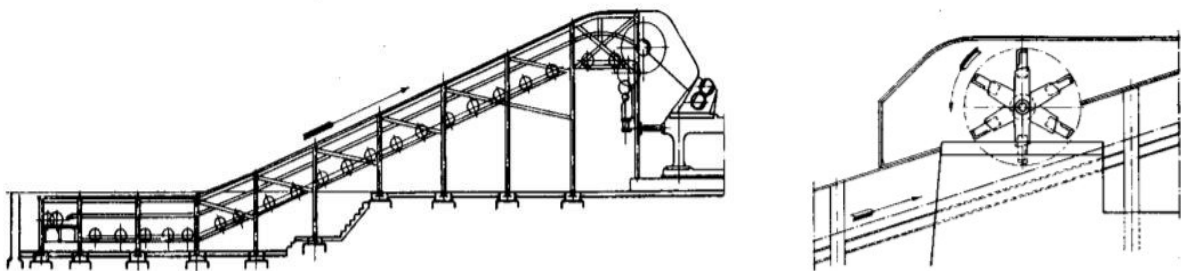


Figura 3. (a) Conductor de caña (b) Cuchillas cañeras (Fuente: Departamento de mantenimiento IANCEM).

La fibra se dirige hacia el tándem de molinos (Figura 5), cada uno consta de 5 masas (Figura 4) estas consisten en 5 cilindros ranurados que sirven para moler la fibra que pasa por cada uno de los molinos extrayendo el jugo de caña. El tándem es el conjunto de molinos, para el caso de IANCEM se tiene 5 en total y cada molino contiene 4 masas.



Figura 4. Cilindros ranurados (masas) (Fuente: Propia).

Con el fin de extraer la máxima cantidad de jugo, se añade agua de imbibición a una temperatura aproximada de 80°C. El agua proviene de los condensados finales del proceso. La adición del agua de imbibición provoca que el bagazo contenga un cierto porcentaje de humedad que, de ser alto, puede ser perjudicial para el rendimiento de la caldera debido a que el poder calórico del bagazo disminuye cuando su humedad aumenta. Por otro lado, la adición del agua permite optimizar la extracción de sacarosa en un 15 % aproximadamente.

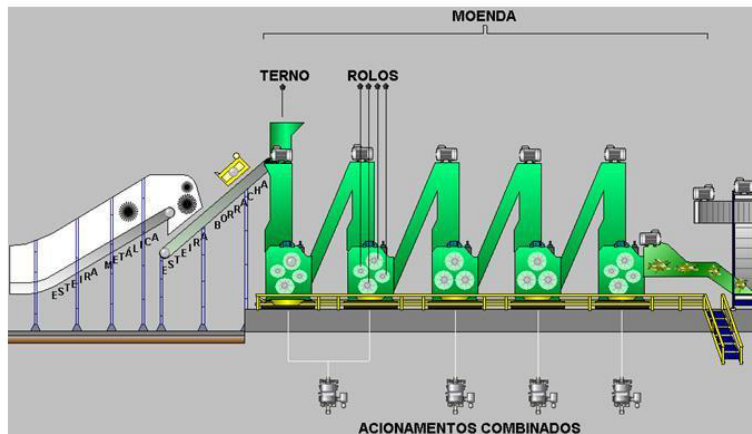


Figura 5. Tándem de molinos (Fuente: SMAR Thechnology Company).

Paralelamente al proceso de imbibición se realiza la maceración el cual consiste en remojar el bagazo con el jugo producto de la imbibición, es decir el jugo que se extrae a la salida de un molino es aplicado en el molino anterior.

En el caso del tándem de 5 molinos de la empresa, la maceración es aplicada en los molinos dos, tres y cuatro, por último, se termina con la imbibición al quinto molino. El producto resultante de la fibra que pasa a través del tándem es el bagazo, el cual es dirigido hacia la caldera y utilizado como combustible o almacenado (Figura 6) y vendido para usos agrícolas e industriales.



Figura 6. Almacenamiento de bagazo. (Fuente: Propia)

1.4.3.3 Clarificación

El jugo mixto (mezcla de agua, jugo, azufre y suciedad) caliente es bombeado hacia los clarificadores (Figura 7), estos son tanques grandes donde el jugo circula. El jugo es limpiado y clarificado gracias a la ayuda de floculantes ingresados dentro del clarificador, su trabajo es que los lodos y cachaza presentes en el jugo se precipiten hacia el fondo, este precipitado contiene cierto porcentaje de jugo que debe ser extraído; por ello, el precipitado es dirigido hacia un filtro rotatorio donde por la acción de una absorción de vacío este jugo es filtrado y devuelto al proceso. La cachaza y lodos son transportados por un tornillo sin fin hacia los volquetes.

El jugo clarificado sale de esta etapa con un pH entre 6,6 y 7.



Figura 7. Clarificadores (Fuente: Propia)

1.4.3.4 Evaporación

El jugo clarificado pasa por una configuración de 6 evaporadores (Figura 8). Esta configuración es denominada evaporación de múltiple efecto y consiste en extraer la mayor cantidad de agua del jugo clarificado a medida que este circula por cada evaporador. De este proceso se obtiene jarabe crudo, es decir, jugo de caña clarificado con la menor cantidad de agua posible.



Figura 8. Evaporadores (Fuente: Propia)

El corazón del proceso de evaporación es el pre-evaporador (Figura 9), este es considerado como una caldera de baja presión, por este circula vapor saturado de 20 psi a 25 psi y 130°C. El pre-evaporador está formado por un intercambiador de calor de tubos verticales por donde pasa el jugo clarificado y este es calentado por el vapor que recorre por el exterior de los tubos.



Figura 9. Pre-evaporador (Fuente: Propia).

2 METODOLOGÍA

La realización de este proyecto se ha fundamentado en los lineamientos que rigen la norma ISO 50002, esta brinda a las industrias una guía internacional para la gestión y desarrollo del desempeño energético. Por tal motivo se ha planteado una serie de pasos para la implementación de la norma en el Ingenio Azucarero del Norte, tomando en cuenta las necesidades y disposiciones de la empresa.

Ya que la revisión bibliográfica se vio en el apartado anterior. En este punto, se describirá la principal fuente de generación de vapor (caldera Dallas) para dar a conocer las condiciones y parámetros necesarios que servirán de guía en la realización de este proyecto. A continuación, se realizará un estudio del funcionamiento del sistema de vapor. Para realizar una recopilación histórica de datos, primero se identificó la línea base del consumo de energía. Con los datos obtenidos se revisará la destrucción de exergía en el sistema de vapor para con estos resultados identificar las oportunidades de ahorro energético (Figura 10).

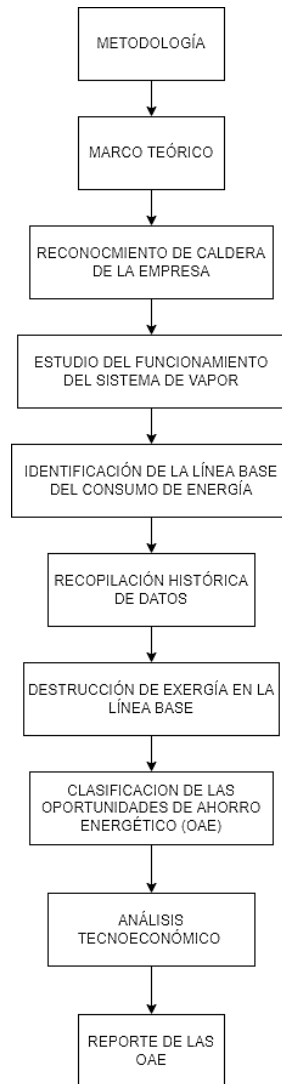


Figura 10. Metodología. (Fuente: Propia)

2.1 Reconocimiento de caldera en la empresa

2.1.1 Caldera Dallas

La Caldera Dallas es el corazón de la producción de vapor y la producción de azúcar en IANCEM. La caldera se encarga de proporcionar la mayor parte de energía eléctrica y el vapor necesario para los procesos de producción en la planta. Esta cuenta con una banda alimentadora del bagazo para su combustión, sistema de acondicionamiento y alimentación de agua, sistema de generación de vapor, sistema de succión y extracción de gases de combustión, purgas, horno para la combustión y esta recubierta casi en su totalidad para evitar pérdidas de calor.

La caldera se dedica exclusivamente a la generación de vapor, esta activa las 24 horas del día, con excepción de los días en donde se realiza su mantenimiento (cada 15 días, los lunes). La caldera genera vapor durante 6 840 horas al año. La caldera está diseñada para producir

vapor a 400 °C y 380 psi, con un rango de generación que va de 22 t/h a 26 t/h pudiendo llegar hasta casi las 28 t/h de vapor. La generación de vapor dependerá de la calidad del combustible, en este caso la calidad está definida por la humedad del bagazo. En IANCEM el bagazo tiene una humedad del 50 %. La caldera dallas es de tipo acuotubular (figura 11).

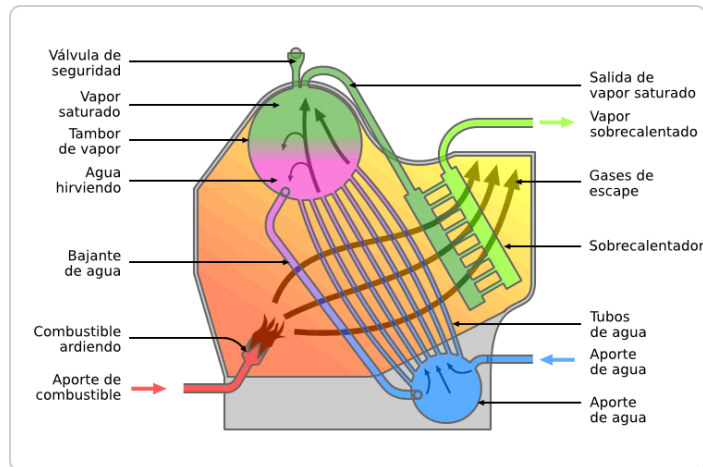


Figura 11. Diagrama de caldera acuotubular (Fuente: Harris, 1997).

Como se muestra en la figura 11, la caldera dallas cuenta con 2 domos uno inferior que está lleno de agua en su totalidad y un domo superior (figura 12) donde coexiste agua saturada y vapor sobrecalentado de mediana presión, posee paredes aletadas recubiertas, hornos con parrillas basculantes y su evacuación de cenizas realizada por tornillos sin fin. Para el ingreso de agua posee dos tanques de recolección de condensados, precalentador y economizador. Para la evacuación de gases, control de cenizas posee varios ventiladores: ventilador neumático, ventilador inducido. Y para el ingreso del aire a la caldera están el ventilador sobre fuego y el ventilador de tiro forzado. La Figura 13 muestra el exterior de la caldera donde se encuentran el economizador, precalentador, chimenea y ventiladores.



Figura 12. Domo superior de caldera Dallas (Fuente: Propia).



Figura 13. Exterior de la caldera (Fuente: Propia).

La alimentación de agua es posible gracias a la ayuda de dos bombas eléctricas, una realiza el bombeo de agua hacia los tanques y la otra es utilizada en caso del daño de la primera. El nivel del domo superior de agua es controlado por un sensor de nivel (Figura 14) que es monitoreado en la cabina de control de la caldera (Figura 15).



Figura 14. Sensor de nivel (Fuente: Propia).

Como se menciona antes la caldera se monitorea desde una cabina de control, en ella todos los parámetros arrojados por los diferentes sensores de la caldera son controlados y revisados por tres operarios en un turno de 8 horas cada uno. En la figura 15 se muestra la interfaz del control de la cabina. Los parámetros monitoreados para garantizar un buen desempeño de la caldera son:

- Nivel de agua en el domo superior.
- Nivel de agua en los tanques de condensado para controlar su alimentación.
- Temperatura de agua de alimentación

- Temperatura de agua en la caldera.
- Control de amperaje, encendido y apagado de las bombas de agua de alimentación para la caldera.
- Temperatura y presión del hogar.
- Regulación de velocidad y control de encendido y apagado de los ventiladores: tiro forzado, tiro inducido, sobre fuego y neumático. Estos ayudan a la evacuación de cenizas y bagacillo (polvo restante del bagazo).
- Control de la entrada de combustible (sin embargo, no existe un contador del flujo del mismo).
- Condiciones del agua para programar purgas.

El agua de ingreso a la caldera es recolectada de los condensados de fábrica, legan principalmente de los condensados generados de proceso de evaporación del agua de jugo de caña.

En caso de un bajo nivel de agua, se compensa agua desde el rio la cual es ablandada en un principio para luego ser bombeada hacia el precalentador y economizador y finalmente a los domos de la caldera. El agua utilizada proviene del rio Chota la cual es tratada en varias piscinas (Figura 15) y destinada a toda la planta incluyendo a la caldera.

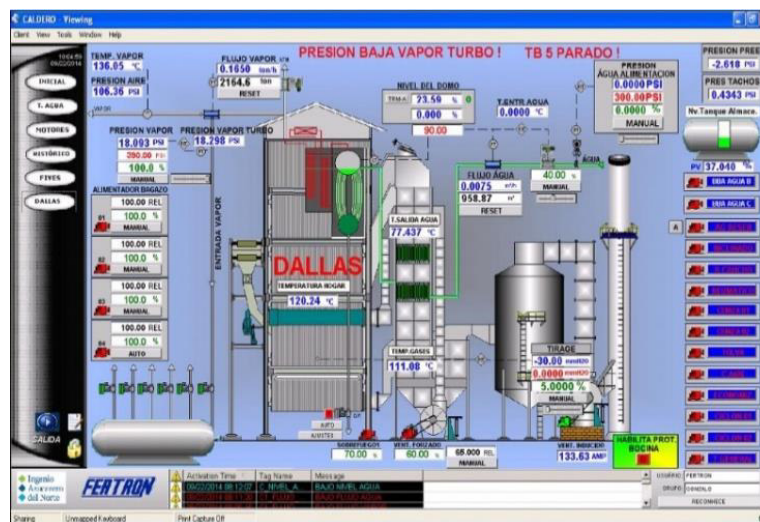


Figura 15. Interfaz para control de la caldera (Fuente: Departamento de mantenimiento IANCEM).



Figura 16. (a) Bombas al río (b) Piscinas de tratamiento de agua del río (Fuente: Propia).

2.2 Estudio del funcionamiento del sistema de vapor

2.2.1 Tratamiento y acondicionamiento de agua

El agua es bombeada desde el río Chota como se muestra en la figura 16a y luego es tratada por una serie de piscinas figura 16b para luego ser utilizada en toda la fábrica en sanitarios y agua potable para consumo, parte de esta agua servirá como agua de reposición para la caldera.

Antes de que el agua ingrese a la caldera esta debe ser tratada mediante la adición de productos químicos con el objetivo de evitar posibles incrustaciones y complementar el tratamiento externo (ablandamiento), evitar la corrosión o desgaste de la tubería y las instalaciones, mantener las superficies de intercambio de calor en las mejores condiciones de transferencia de calor y evitar taponamientos.

Las condiciones en las que debe estar el agua de alimentación son: cómo se puede observar en la Tabla 1, la dureza debe ser en lo posible de 2 ppm cercana a cero. Los sólidos disueltos totales (SDT) deben ser máximo 2 300 ppm (Tabla 2), pudiendo regular o controlar en la caldera con la purga continua y la purga de fondo.

Tabla 1. Condiciones del agua de alimentación (Fuente: IANCEM).

Dureza:	2 a 4 ppm (máx.)
pH:	7 a 8,5
O2 disuelto:	<7 ppb

Tabla 2. Condiciones del agua dentro de la caldera (Fuente: IANCEM).

pH:	10,5 a 11,5
SDT:	450 a 2 300 ppm
Alcalinidad OH:	100 a 300 ppm

Para lograr estas condiciones del agua dentro y fuera de la caldera se utiliza un secuestrante de oxígeno (NALCO 1 721) en una dosis aproximada de 3,5 kg/día para controlar el oxígeno disuelto, el producto fosfato-polímero-dispersante (NALCO 9 546) como inhibidor de corrosión. Hidróxido de sodio líquido para evitar precipitación de carbonatos. El pH evita que se formen carbonatos.

2.2.1.1 Sistema de purgas

Las purgas son necesarias para eliminar los sólidos disueltos en el agua y los lodos que se van concentrando dentro de la caldera. Existen dos tipos de purgas, la purga lateral que es continua y sirve para eliminar la concentración de aceites, espumas de la superficie del domo superior y la purga inferior o de fondo, que elimina los sedimentables y lodos. La purga de fondo se la purga dos veces por turno y mínimo una vez por día dependiendo de los valores de SDT para mantener niveles no mayores a 2 300 ppm.

2.2.1.2 Condensados

El retorno de condensados (Figura 17) se ha medido con respecto a la entrada de agua a en la caldera, dando un promedio de 14,5 t/h. Este valor justifica el hecho de que el vapor generado en la caldera retorna a su inicio en menor cantidad debido a las diferentes perdidas en su paso por el turbogenerador seguido por su entrada al pre-evaporador. En la Figura 18b se puede observar la tubería principal de condensados provenientes del pre-evaporador



Figura 17. Condensados (Fuente: Propia).

En el pre-evaporador (Figura 9) se utiliza todo el vapor aún sobrecalentado que sale del turbogenerador trampeando sus condensados y retornando a la caldera, además el vapor que se extrae del jugo de caña es condensado para también retornar a la caldera, sin antes haber pasado por sensores de conductividad. Para reposición y alimentación se usan

aproximadamente 40 t/mes, sólo para inicio o arranque de la molienda, sin embargo, el requerimiento de agua puede ser menor debido a que toda el agua que contiene la caña es aprovechada en el proceso y devuelta hacia la caldera.

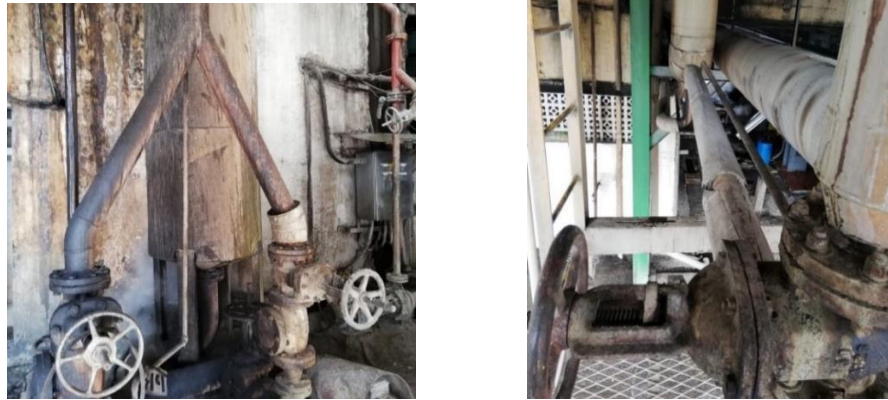


Figura 18. (a) Bombas de condensado a la caldera (b) Tubería principal de condensados del pre-evaporador (Fuente: Propia).

2.2.2 Combustión

Los parámetros para la combustión se encuentran en la Tabla 3. Cuando el bagazo es transportado después de la molienda hacia la caldera posee aproximadamente la composición descrita en la Tabla 4. Los parámetros de gases de combustión se observan en la Tabla 5.

Tabla 3. Parámetros para la combustión (Fuente: IANCEM).

Volumen del hogar	17m ³
Presión necesaria	0,2 mmH ₂ O en el hogar
Porcentaje de apertura en el ventilador de tiro forzado	60%
Porcentaje de apertura del ventilador de sobrefuego	65%

Tabla 4. Propiedades del combustible. (Fuente: IANCEM)

Humedad (50%)	50%
Sólidos solubles (5%)	5%
Sólidos insolubles o fibra cruda (45%)	45%
Cantidad de bagazo estimado	12 t/h consumido en la combustión
Poder calorífico	8 210,78 kJ/kg
Composición Química	
Carbono	47%
Hidrógeno	6,5%
Oxígeno	44%
Cenizas	2,5%

Tabla 5. Parámetros de gases de combustión. (Fuente: IANCEM)

Temperatura de gases a la salida antes del ventilador de tiro inducido	135°C
Flujo de aire ventilador inducido	6 2000cfm
Presión	9,5 plgH ₂ O
Oxígeno O	4%

Dióxido de carbono CO2	12%
Monóxido de carbono	1 144 ppm
La operación de la caldera	380 psi, 400°C
Flujo de gases	101 233 m ³ /h seco
Material particulado	387 mg/ Nm ³

2.2.3 Requisitos de mantenimiento

El mantenimiento hace énfasis en la calidad de agua dentro y fuera de la caldera para evitar incrustaciones. En las zonas de alta temperatura (hogar) se revisa deshollinadores para evitar acumulación de ceniza, también se revisa el banco de tubos de la pantalla de agua (Figura 19), revisión de pistones para accionamiento normal de parrillas; revisión y limpieza quincenal de precalentador y economizador.

Se prioriza la calidad del agua mas no el ingreso de combustible debido a que no se tiene un registro exacto del flujo que ingresa a la caldera, por esta razón se tiene una combustión incontrolada. La única variable que se puede controlar en la combustión es la apertura de ventiladores. Además, se tiene una revisión de válvulas de seguridad (Figura 19b) y válvulas de despresurización rápida, sin mencionar el control de la lubricación de las bombas de agua a los tanques de almacenamiento.



Figura 19. (a) Falla por abrasión (b) Válvula de seguridad domo superior. (Fuente: Propia)

2.3 Identificación de la línea base

El diagrama de la línea base se puede apreciar en el ANEXO II. El sistema de vapor (Figura 20a) trabaja en conjunto con la generación de vapor en la caldera, es decir las 24 horas y se para cada quince días. La distribución en alta presión y temperatura se dirige al Turbogenerador (Figura 21b) con una capacidad de generación nominal de 2 MW. El vapor sale del turbogenerador a una presión de 20 psi a 25 psi y una temperatura de aproximadamente 200°C; a través de una cámara de atemperamiento se reduce la

temperatura del vapor mezclándolo con agua a 80 °C para poder saturarlo y sea distribuido hacia el pre-evaporador.



Figura 20. (a) Sistema de vapor (b) Turbogenerador (Fuente: Propia).

Cuando no existe suficiente presión del vapor de escape del turbogenerador (para la debida producción de azúcar) se ingresa vapor de compensación a través de una válvula reductora, la cual distribuye 1 t/h de vapor hacia el proceso. Para reducir la presión se utiliza dos válvulas de reducción de presión, disminuyendo de 380 psi a 25 psi, con una temperatura de 135°C. Este requerimiento de compensación solo ocurre cuando la presión de la caldera esta sobre 350 psi y la presión del pre-evaporador está bajo los 20 psi.

El pre-evaporador recibe todo el vapor que sale del turbogenerador y sus condensados retornan a la caldera, también ingresa jugo claro compuesto de jarabe y agua, este jugo se calienta y pasa a otros evaporadores en donde se consume el vapor proveniente del propio jugo calentado, este efecto se mantiene en cuatro equipos hasta el último que tiene un sistema de vacío. A este proceso se lo denomina evaporación de múltiple efecto (Zambonino, 2013) y permite extraer entre un 44% a 48% de agua que viene en el flujo del jugo de la caña. Además de este proceso, el vapor proveniente del pre-evaporador se lo ocupa en: tachos del 1 al 4 y cristalizadores del 1 al 7. Por tal motivo este recorrido del vapor proveniente de jugos no será tomado en cuenta en el análisis de la línea base. En el ANEXO III se muestra este recorrido.

En la Figura 21 se muestra el grafico de Temperatura - Entropía del ciclo termodinámico al cual está regida la línea base. El punto uno es la generación de vapor, el punto 2 es la caída de presión debido al paso del flujo por la turbina. El punto 3 muestra la reducción de temperatura y presión por causa del atemperador y su entrada al pre-evaporador y, por último, el punto 4 es el retorno de los condensados a la caldera.

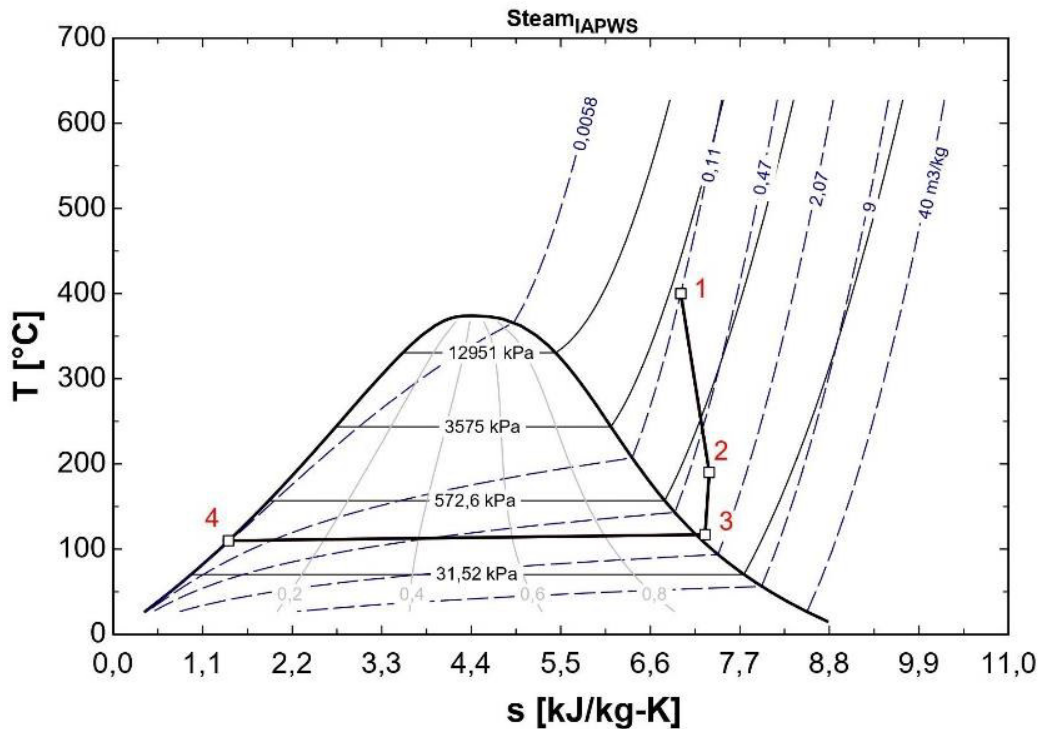


Figura 21. Ciclo termodinámico de la línea base de IANCEM (Fuente: Propia).

2.4 Recopilación histórica de datos

2.4.1 Parámetros de la generación de vapor

El generador de vapor es el corazón de los procesos para la producción de azúcar, por ello es de suma importancia analizar su eficiencia y el consumo específico de energía, con estos indicadores podremos llegar a una conclusión sobre el estado actual de la caldera y sus diferentes falencias de ser el caso. Debido a esto se recopiló una considerable cantidad de datos de presiones y consumo de vapor, temperatura y flujo de agua de alimentación para poder calcular los indicadores energéticos antes mencionados. La información recopilada se muestra en el ANEXO IV. Además de los parámetros de la Caldera, se recopiló información sobre los principales elementos del sistema de vapor, tal como son: turbogenerador, atemperador, pre-evaporador, recubrimientos y tuberías.

La caldera es una máquina térmica que no genera trabajo sin embargo se la puede analizar como tal (Dincer, 2020). En la Figura 22 está representada una caldera con sus respectivas entradas y salidas y pérdidas de calor asociadas al proceso.

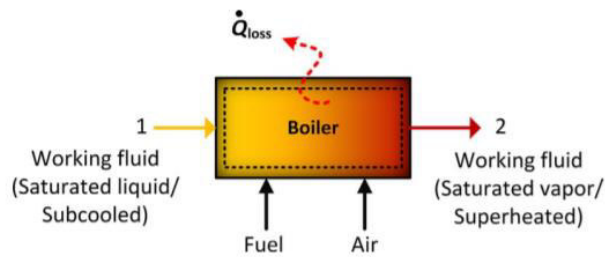


Figura 22. Esquema básico de una caldera (Fuente: Dincer, 2020).

Las propiedades termodinámicas del vapor de salida y de agua de alimentación (entalpías y entropías) se determinan tomando en cuenta las propiedades termodinámicas de presión y temperatura tanto para el vapor a la salida de la caldera y el agua a la entrada de esta. Los cálculos de estas propiedades están considerados en la tabla 6.

El valor del poder calorífico superior (PCS) es el mismo encontrado en el análisis realizado por la empresa en el año 2015 (Enríquez, 2015), también esta expresado en la tabla 6.

Tabla 6. Datos utilizados y sus propiedades termodinámicas. (Fuente: Propia)

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Flujo agua	14,49	m ³ /h
Temperatura de agua alim.	113,89	°C
Entalpía de agua alim.	480,57	kJ/kg
Entropía de agua alim.	1,459	kJ/kg-K
Flujo de vapor	25,5	t/h
Temperatura de vapor	390,05	°C
Presión vapor	2,52	MPa
Entalpía de vapor	3217,46	kJ/kg
Entropía de vapor	6,98	kJ/kg-K
Flujo de bagazo	14,72	t/h
Poder calorífico del Bagazo de caña	8210,78	kJ/kg
Temperatura Ambiente	300	K

Como se mencionó anteriormente el bagazo de la caña de azúcar es el combustible utilizado en el proceso. Debido a que IANDEM no posee un valor exacto de la cantidad de bagazo que ingresa a la caldera, se realiza un estimado de este valor considerando la información del estimado de las toneladas de caña molida por hora. El valor del flujo de bagazo o flujo de combustible dependerá de la humedad del bagazo, la cantidad de fibra que posee la caña y la cantidad de fibra que posee el bagazo (Hugot, 1963). En primer lugar, se toma en cuenta la fibra dentro del bagazo la cual depende directamente de la humedad utilizando la ecuación 3 (Hugot, 1963), esta varía del 47% al 56%.

$$F = 100 - \omega - D = 47 \text{ al } 56\%$$

Ecuación 3. Fibra dentro del bagazo.

Una vez obtenida la fibra del bagazo se relaciona la cantidad total de bagazo (B) y la fibra dentro de la caña (f) la cual está entre el 12% al 14. La Ecuación 4 (Hugot, 1963) junta las 3 variables y las compara tomando en cuenta 100 partes de caña.

$$100f = B * F$$

Ecuación 4. Fibra dentro de la caña.

Despejando se obtiene la Ecuación 5:

$$B = 100 \frac{f}{F}$$

Ecuación 5. Cantidad de Bagazo.

DONDE:

B Cantidad de Bagazo

f Porcentaje de fibra en la caña de azúcar.

F Porcentaje de fibra en el bagazo.

La cantidad de bagazo presente en la caña de azúcar estará en el rango del 24% al 28%. En términos de flujo de combustible se utiliza el dato obtenido de las toneladas de caña molidas por hora y se lo multiplica por el 26%, obteniendo 14,78 toneladas de combustible por hora.

$$B = 0,26 * 56,88 \text{ t/h} = 14,78 \text{ t}_c/\text{h}$$

2.4.2 Parámetros para la producción de energía.

En IANCEM el vapor generado en la caldera Dallas es dirigido hacia el turbogenerador el cual produce entre 1,3 MW y 1,5 MW de energía eléctrica. La turbina genera trabajo gracias a la corriente de vapor que pasa por sus alabes hasta expandirse. A pesar de tener una generación de energía en promedio de 1,3 MW la turbina de IANCEM es una turbina de vapor con capacidad para generar 2 MW de energía. El trabajo mecánico realizado por la turbina es máximo cuando no existe una transferencia de calor entre ambos puntos, y su proceso es isentrópico es decir que no existen irreversibilidades (Dincer, 2020). La figura 23 representa un esquema básico de una turbina.

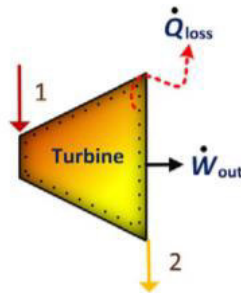


Figura 23. Esquema de entradas y salidas de la turbina (Fuente: Dincer, 2020).

En la Tabla 7 se muestra el resumen de los parámetros de entradas y salidas para la turbina de IANCEM y las propiedades termodinámicas del fluido (entropías y entalpías) necesarias para el debido análisis exergético de la misma.

Tabla 7. Parámetros de entradas y salidas de la Turbina. (Fuente: Propia)

Descripción del parámetro	Cantidad	Unidad
Flujo de vapor	7,08	kg/s
Temperatura de vapor	390,05	°C
Presión de vapor	365,06	psi
Presión de vapor (SI)	2,52	MPa
Entalpía de vapor entrada	3217,46	kJ/kg
Entropía de vapor entrada	6,97	kJ/kg
Presión vapor Salida	0,241	MPa
Temperatura Vapor Salida	200	°C
Entalpía vapor salida	2868,82	kJ/kg
Entropía vapor salida	7,418	kJ/kg
Generación	1400	kW

El trabajo útil producido por la turbina esta relacionado directamente con el movimiento del eje de la misma, este movimiento ocurre gracias al paso del fluido altamente energético a través de la turbina. (Dincer, 2020).

2.5 DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA EN LA LINEA BASE

Como se mencionó en el apartado 2.1, un análisis de la eficiencia de primera ley no es suficiente para determinar el estado de las maquinas térmicas ocupadas en la industria, es por eso que para el caso de IANCEM se calcularán eficiencias exergéticas o de segunda ley para cada equipo que lo requiera. Por tanto, habrá 3 análisis exergéticos en la línea base. El primero será realizado para la caldera Dallas que es el motor principal de la industria en IANCEM. El segundo análisis será para la turbina que recibe el flujo directo desde la caldera y

transforma la corriente del fluido en trabajo útil en forma de energía eléctrica. El tercer análisis será utilizado para el atemperador (considerado como una cámara de mezcla), a simple vista este presenta una gran cantidad de exergía destruida debido a que toma el flujo de la turbina y reduce su temperatura.

2.5.1 Eficiencia exergética de la caldera Dallas

En el apartado 2.3.4 se definió la eficiencia de primera ley de la caldera Dallas y su respectivo resultado, esta se calculó mediante el método directo a partir de la consideración de sus entradas y salidas. Sin embargo, y como se ha mencionado ya en este trabajo, la primera ley de la termodinámica no nos brinda un enfoque completo de la calidad y condición de la energía. Es por esto que, para obtener una visión completa y general de la calidad de la generación de vapor es recomendable utilizar la eficiencia exergética para la caldera Dallas, está definida por la Ecuación 6 (Escamilla 2007).

$$\varepsilon_{cal} = \eta_g \left(\frac{m_v(e_v - e_{aa})}{m_c * e_c} \right)$$

Ecuación 6. Eficiencia exergética.

Donde:

η_g = Eficiencia de la caldera Dallas (%)

m_v = Flujo másico de vapor (t/h)

m_c = Flujo másico de combustible (t/h)

e_v = Exergía específica del vapor (kJ/kg)

e_{aa} = Exergía específica del agua de alimentación (kJ/kg)

e_c = Exergía específica del combustible (kJ/kg)

En los cálculos de las exergías específicas intervienen las propiedades termodinámicas del fluido a las condiciones del ambiente, estas propiedades están dadas en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades termodinámicas del fluido (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	Cantidad	Unidad
Temperatura Ambiente	300	K
Presión Ambiente	78,1	kPa
Entalpía del fluido a condiciones ambientales	113,2	kJ/kg
Entropía del fluido a condiciones ambientales	0,394	kJ/kg

Las exergías específicas para cada uno de los fluidos son calculadas con los parámetros y propiedades termodinámicas de la Tabla 6 y 8. Y utilizando las Ecuaciones 7, 8 y 9 (Escamilla, 2007) dependiendo de la exergía que se calcule.

$$e_o = h_o + T_o * (s_o)$$

Ecuación 7. Exergía específica del fluido a las condiciones del Ambiente.

Donde, h_o y s_o son la entalpía y entropía del fluido respectivamente a temperatura ambiente (T_o) y presión ambiente.

$$e_v = h_v - h_o + T_o * (s_v - s_o)$$

Ecuación 8. Exergía específica del vapor.

Donde, h_v y s_v son la entalpía y entropía del vapor respectivamente a temperatura y presión del vapor en la caldera.

$$e_{aa} = h_{aa} - h_o + T_o * (s_{aa} - s_o)$$

Ecuación 9. Exergía específica del agua de alimentación.

Donde, h_{aa} y s_{aa} son la entalpía y entropía del agua de alimentación respectivamente a temperatura y presión del vapor en la caldera.

La exergía específica del bagazo estará dada por su poder calorífico (Escamilla, 2007).

Los cálculos de las exergías específicas, así como también el de la eficiencia exergética de la caldera se muestran en la siguiente Tabla 9. Dichos valores tendrán una discusión más extensa en los siguientes apartados.

Tabla 9. Datos calculados de la eficiencia exergética de la caldera (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Exergía específica del fluido a condiciones ambiente	231,4	kJ/kg
Exergía específica del agua de alimentación	42,87	kJ/kg
Exergía específica del vapor generado	1 123,46	kJ/kg
Exergía específica del combustible	8 210,78	kJ/kg
Eficiencia exergética de la caldera	13,42	%

2.5.2 Eficiencia exergética de la turbina.

La turbina de vapor de IANCEM recibe el flujo de vapor de la caldera Dallas, una vez obtenida su eficiencia energética considerando el trabajo producido y el trabajo útil, se procede a calcular la eficiencia exergética de la misma con ayuda de la Ecuación 10 (Dincer, 2020). En este caso se considera que el trabajo mecánico producido por el eje es la exergía útil producida por la turbina, esta se relaciona con el cambio de la exergía producida por el paso

del vapor en la turbina. De esta forma el rendimiento exergético se lo expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{turbine} = \frac{\dot{m} (h_v - h_{v,s})}{\dot{m} (h_v - h_{v,s} - T_o(s_v - s_{v,s}))}$$

Ecuación 10. Eficiencia exergética de la turbina.

Donde:

\dot{m} = Flujo másico a través de la Turbina (kg/s)

T_o = Temperatura ambiente absoluta

h_v = Entalpía del vapor a la entrada de la turbina (kJ/kg)

$h_{v,s}$ = Entalpía de vapor a la salida de la turbina (kJ/kg)

s_v = Entropía del vapor a la entrada de la turbina (kJ/kg)

$s_{v,s}$ = Entropía de vapor a la salida de la turbina (kJ/kg)

No está por demás señalar la diferencia entre una eficiencia isentrópica y una eficiencia exergética. Para la isentrópica se considera un proceso ideal, sin transferencia de calor y sin irreversibilidades entre la entrada y una salida hipotética de la turbina. Para la eficiencia exergética se considera un proceso reversible entre dos estados (entrada y salida) reales (Dincer, 2020).

Considerando los parámetros obtenidos del vapor y sus respectivas propiedades termodinámicas a la entrada y a la salida de la turbina representados en la Tabla 7, se calcula el rendimiento exergético de la turbina:

$$\varepsilon_{turbine} = \frac{7,08 \frac{kg}{s} (3217,46 - 2868,28) \frac{kJ}{kg}}{7,08 \frac{kg}{s} (3217,46 - 2868,28 - 300(6,97 - 7,418))} = 0,7218 \text{ o } 72,18 \%$$

Obteniendo un valor del 72,18%. El análisis correspondiente a este valor se realizará en los siguientes apartados.

2.5.3 Eficiencia exergética de la cámara de mezcla (Atemperador).

El Atemperador posee 2 entradas y 1 salida. En este dispositivo térmico se mezclan dos flujos en diferentes fases con el fin de saturar al vapor de agua a una baja presión y baja temperatura, en la Figura 24 se muestran las diferentes entradas y salidas del atemperador con sus respectivos valores nominales.

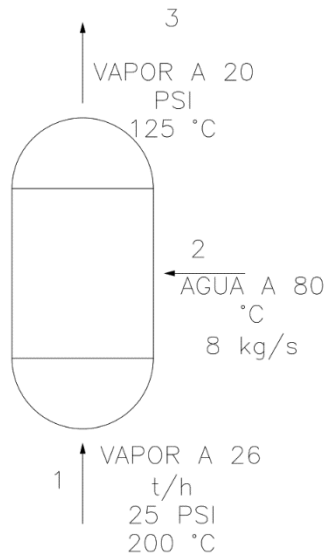


Figura 24. Entradas y salidas del atemperador (Fuente: Propia).

Los valores están considerados con respecto a los datos tomados en IANCEM los cuales están resumidos en la Tabla 10. Cada número señala el orden de las entradas y la salida del atemperador, de acuerdo con la Figura 24.

Tabla 10. Datos obtenidos en el atemperador (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Flujo de agua [2]	2,22	kg/s
Flujo de vapor [1]	6,94	kg/s
Densidad del vapor a Presión y Temp. dadas	972,9	kg/m ³
Temperatura agua entrada [2]	80	°C
Temperatura vapor entrada [1]	200	°C
Temperatura vapor salida [3]	121	°C
Presión vapor entrada [1]	241	kPa
Presión vapor salida [3]	127	kPa
Entalpía vapor entrada atemperador h1	2868	kJ/kg
Entalpía agua entrada atemperador h2	336,9	kJ/kg
Entalpía vapor salida atemperador h3	2716	kJ/kg
Entropía vapor entrada atemperador s1	7,417	kJ/kg-K
Entropía agua entrada atemperador s2	1,074	kJ/kg-K
Entropía vapor salida atemperador s3	7,356	kJ/kg-K

Los parámetros de la Tabla 10 con sus respectivas propiedades termodinámicas serán utilizadas para el cálculo de la eficiencia exergética del atemperador, de acuerdo con la Ecuación 11 (Escobar & Cárdenas, 2018).

$$\varepsilon_{atemp} = \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}$$

Ecuación 11. Eficiencia exergética del atemperador.

Donde \dot{E} representa la cantidad de exergía neta que transmite el fluido en las entradas y salidas a sus condiciones particulares de presión y temperatura. Por tanto, las fórmulas para cada exergía se expresan de la siguiente forma:

$$\dot{E}_3 = \dot{m}_3(h_3 - h_0 - T_0(s_3 - s_0))$$

Ecuación 12. Exergía en la salida del atemperador, punto 3.

$$\dot{E}_2 = \dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0))$$

Ecuación 13. Exergía en la entrada del Atempador, punto 2.

$$\dot{E}_1 = \dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0))$$

Ecuación 14. Exergía en la entrada del Atempador, punto 1.

Las entropías, entalpías con el subíndice 0 son las propiedades del fluido a las condiciones medio ambientales. Una vez definido las exergías de cada entrada y salida del atemperador se calcula su eficiencia. En la Tabla 11 se muestra un resumen de los cálculos realizados para el atemperador. Estos valores serán revisados con más detalle en el siguiente apartado, para conocer si el calor que ingresa a esta sección es aprovechado lo suficiente.

Tabla 11. Cálculos realizados en el atemperador (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Exergía en el Punto 3	4502	kW
Exergía en el Punto 2	43,32	kW
Exergía en el Punto 1	3 309	kW
Destrucción de Exergía	1 149,68	kW
Eficiencia exergética del Atempador	86	%

2.6 IDENTIFICACION DE OPORTUNIDADES DE AHORRO ENERGÉTICO

En el recorrido realizado a través de la línea base del sistema de vapor en IANCEM, se encontraron varias secciones donde existen pérdidas tanto de combustible como de calor. Estas pérdidas energéticas son traducidas como pérdida económica para la empresa. Es por este motivo que se ha propuesto 4 oportunidades de ahorro energético (OAE) en las secciones donde se encontró la forma de reducir costes de combustible y pérdidas de calor. A continuación, se detallan 2 de las OAE encontradas para la empresa:

1. Control de flujo de agua en el atemperador

Una vez obtenidos los resultados de la pérdida de exergía en la línea base podemos definir esta OAE. La pérdida exergética en el atemperador es relativamente baja, sin embargo, cabe

señalar que un gran potencial de exergía se pierde en la reducción de temperatura del vapor sobrecalentado. Por ello gran parte de este calor puede ser reutilizado en otros procesos. Esta línea de vapor que ingresa al atemperador puede redirigirse a procesos que requieran de vapor sobrecalentado y de esta forma ir reduciendo su presión y su temperatura sin la necesidad de ingresar este vapor a una cámara de mezcla.

Sin embargo, esto supondría una gran inversión por parte de IANCEM, debido a la cantidad de material necesario para cumplir esta reubicación de tubería sin tomar en cuenta la mano de obra y los análisis necesarios para completarla. Por ello se propone una optimización del atemperador, un control del flujo de agua de ingreso, mediciones del flujo de vapor de entrada y flujo de vapor de salida mediante sensores de flujo los cuales son dispositivos instalados en la tubería para determinar la cantidad de materia de un fluido que pasa a través de esta (Cedeño, 2020). Controlando estos parámetros de entrada y salida se puede analizar la calidad del proceso y por ende su eficiencia. En la industria, la medición de fluidos es importante para la cuantificación de la cantidad de materia transferida en el proceso de forma automática (Acedo, 2003).

Existen diferentes alternativas para el control de flujo en línea, (Cedeño, 2020) realizó un módulo para el control de caudal mediante SCADA, PLC y algoritmos PID, de esta forma el realiza un control en línea de caudal, por otro lado, (Acedo, 2003) realizo el diseño y la implementación de un lazo de control de flujo mediante el uso de un sensor de flujo, un convertidor de frecuencia, un PLC, motor trifásico y un variador de velocidad. Este último concluye que un control PID presenta mejores resultados que otros mecanismos de control. En IANCEM es aplicable un control del agua en la tubería de ingreso al atemperador.

2. Optimizar la recuperación de revaporizado y recuperación del condensado generado por el venteo del pre-evaporador, ya que este se deposita en las alcantarillas.

Los procesos para la optimización de masa y energía en la industria han ido avanzando y desarrollándose tecnológicamente con el pasar de los años. La adaptación de estos avances ha permitido un aumento en la eficiencia de la productividad y el uso de la energía en la industria, además de la optimización de recursos tecnológicos y ambientales.

Las herramientas usadas para optimización de procesos provienen de la tendencia moderna de encontrar medios para el ahorro energético utilizando tecnologías limpias, en donde las mismas corrientes energéticas del proceso sean aprovechadas por el mismo. En el caso de la industria azucarera se pretende reutilizar los flujos de vapor que salen tanto de los residuos del turbogenerador como el del vapor vegetal que se extrae del jugo de caña. De esta forma se

logra una reducción del gasto en generación energética y uso de flujos nuevos con alta carga energética (Abreu & Villas, 2012).

La aplicación de la integración energética consiste en la implementación de una red de transferencia de calor eficiente entre las diferentes corrientes del proceso (Hernandez et al, 2007). El enfoque de esta OAE es la recuperación del calor transmitido por corrientes con alto potencial energético para tareas de calentamiento y enfriamiento, sin tomar en cuenta fuentes externas de calor. En el mundo varios ingenios azucareros aplican la integración energética y han logrado resolver sus problemas energéticos (Abreu & Villas, 2012).

En el caso de IANCEM existe inconvenientes con distintos flujos de revaporizado que no son recuperados y son enviados a un sumidero perdiéndose una gran parte de la energía. El revaporizado como tal es el resultado de los condensados despresurizados y a temperatura relativamente alta.

Se propone la introducción de tanques de revaporizado. Estos tanques dividen el condensado del revaporizado, de esta forma el condensado se redirige a la caldera y el revaporizado es reutilizado en el sistema de vapor para conducirlo nuevamente al proceso. En la Figura 28 se muestra un ejemplo práctico de un tanque de revaporizado.

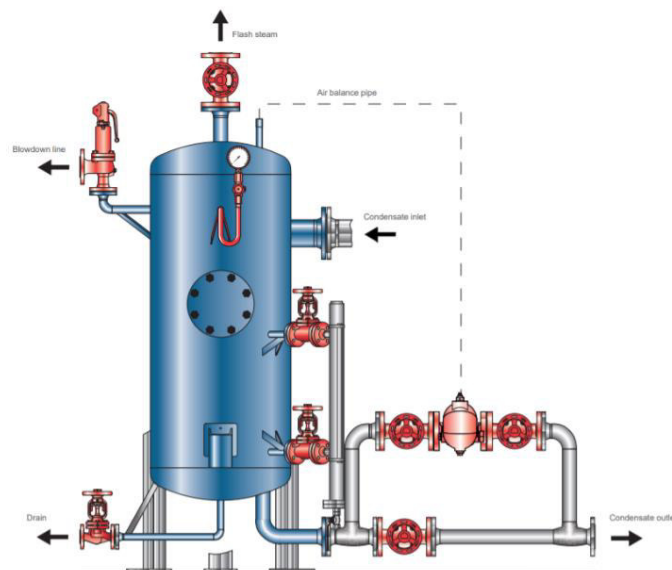


Figura 25. Tanque de revaporizado (Fuente: GESTRA).

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.2 Resultados

3.2.1 Análisis energético y exergético

Los cálculos realizados para el respectivo análisis energético y exergético de cada elemento importante de la línea base del sistema de vapor se resumen en la siguiente Tabla 12. Estos valores serán analizados tomando como base los conceptos de la primera y segunda ley de la termodinámica.

Tabla 12. Resumen de cálculos obtenidos (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Eficiencia térmica de la caldera	58,86	%
Eficiencia del turbogenerador	56,69	%
Eficiencia exergética de la caldera	13,42	%
Eficiencia exergética turbogenerador	72,18	%
Eficiencia exergética del atemperador	76,93	%

3.2.1.1 Caldera Dallas

La demanda de vapor de la turbina sobrepasa a la generada por la caldera es por ello que la generación eléctrica no se acerca a los 2 MW nominales de la turbina. La baja generación de vapor se debe a la baja eficiencia exergética obtenida, de 100 partes de la energía útil del combustible, solo es aprovechado un 13,42%.

Los datos encontrados para IANCEM están en los rangos adecuados de eficiencias y consumos específicos de energía para calderas bagaceras. Sin embargo, existe una deficiencia del vapor, y esta aumenta cuando el bagazo tiene mucha humedad o la caña es de mala calidad.

La eficiencia exergética para la caldera Dallas es del 13,42 %. Las eficiencias exergéticas típicas para calderas bagaceras (con base al poder calorífico del bagazo) están por debajo del 30%, sin embargo, para modelos antiguos como el caso de la caldera Dallas son menores al 20% (Escamilla, 2007). En base a lo anterior descrito, el trabajo útil se puede aumentar hasta alcanzar valores que se aproximen al 20% aumentando así también la eficiencia.

3.2.1.2 Turbogenerador

Las eficiencia exergética para la turbina es del 72,18%. Para mejorar el análisis a la turbina se determina la tasa de calentamiento (Heat Rate) mediante la Ecuación 15. El Heat Rate se define como la cantidad de calor necesaria para producir un kilowatt por hora. Por tanto, es un

indicador de la eficiencia de toda la generación eléctrica, medida por lo general en BTU/kWh (Escamilla, 2007).

$$HR = \dot{m} \frac{h_v - h_{v,s}}{kWh}$$

Ecuación 15. Tasa de calentamiento.

Donde:

\dot{m} = Flujo másico a través de la Turbina (kg/s)

h_v = Entalpía del vapor a la entrada de la turbina (kJ/kg)

$h_{v,s}$ = Entalpía de vapor a la salida de la turbina (kJ/kg)

Se utilizan los valores de la Tabla 7 correspondientes para cada parámetro de la Ecuación 20. Obteniendo así un resultado de 2476,13 kJ/kWh.

El máximo valor para considerar eficiente a un ingenio ronda los 40000 kJ/kWh. (Escamilla, 2007). Al comparar este valor con el obtenido se evidencia la ineficiencia que tiene el turbo para cumplir con lo previsto.

La eficiencia exergética de la turbina es relativamente alta, por tanto, las condiciones energéticas del vapor son bien aprovechadas en el proceso de generación energética, sin embargo, su eficiencia energética señala que el turbogenerador puede realizar una mayor cantidad de trabajo, esta dependerá únicamente de su demanda de vapor. Para IANCEM el consumo de vapor tiene un promedio de 26 t/h, pero este valor no cubre la demanda de flujo para poder generar energía que solvente a toda la empresa (fabrica, procesos, oficinas, etc.). Por ello el turbogenerador soporta un flujo más alto para poder generar una mayor cantidad de energía y de esta forma poder aumentar su eficiencia térmica.

3.2.1.3 Atemperador

En el caso del atemperador, fue necesario analizar su eficiencia exergética, dando un valor del 86%. Se lo analiza desde la pérdida de la exergía, esta se denomina, para el atemperador, como la diferencia del flujo más energético con el producto de la mezcla (Escobar & Cárdenas, 2018). A pesar de tener una eficiencia relativamente alta, el proceso destruye gran parte de la exergía que viene del flujo de vapor sobrecalentado. Sin embargo, la aplicación del proceso de atemperación es necesario para mejorar la eficiencia de los procesos de transferencia de calor que tendrán lugar en el pre-evaporador, ya que el vapor saturado (producto de la atemperación) tiene mejores propiedades de transferencia de calor que un vapor sobrecalentado.

Otras eficiencias exergéticas para atemperadores fueron calculadas por Escobar & Cárdenas en su análisis exergético para una planta de cogeneración del sector azucarero asistida por colectores solares. Los valores de estas eficiencias se aproximan al 99%, teniendo una pérdida exergética mínima, reduciendo la temperatura del flujo sin perder la exergía transportada por el vapor sobrecalentado (Escobar & Cárdenas, 2018). De esta forma se entiende que la eficiencia para el atemperador IANCEM puede aumentar, mediante este análisis se ha propuesto una alternativa de ahorro energética basada en el atemperador.

3.2.2 Análisis tecno económico

El análisis tecno económico se lo realiza en base a las oportunidades de ahorro energético por tanto se tendrá un análisis para cada OAE. Para el análisis se utilizarán los indicadores del valor presente, valor actual neto, la tasa interna de retorno y la relación costo beneficio. Calculados mediante las siguientes ecuaciones:

El valor presente (VP) se calcula con la Ecuación 16 (Blank & Tarquin, 2016):

$$VP = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

Ecuación 16. Valor presente.

Donde:

A = Anualidad.

$\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$ = Factor de valor presente de serie uniforme

i = Tasa de descuento. Para este trabajo se considera la tasa social de descuento estándar aplicada por instituciones de planificación y organismos multilaterales que será del 12%. (Castillo, 2016)

n = Tiempo de permanencia del proyecto, 10 años

Para el Valor actual neto (VAN) se utiliza la Ecuación 17 (Blank & Tarquin, 2016):

$$VAN = -I_0 + VP$$

Ecuación 17. Valor actual neto.

Donde:

I_0 = Inversión Inicial.

VP = Valor presente

La tasa interna de retorno (TIR) será calculada mediante una hoja de cálculo en donde la TIR esté en función del flujo de efectivo.

Las pérdidas energéticas se trasladarán a resultados expresados en pérdidas económicas para la empresa, para esto se necesita el costo del combustible y el costo para producir un kg de vapor, de igual forma el costo para la producción de un kilo Joule de vapor. Para este último se toma en cuenta la entalpía del vapor a la presión y temperatura de generación para el caso de IANCEM este valor es de 3217,46 kJ/kg.

Tabla 13. Costos energéticos (Fuente: Propia).

Consumo específico de energía	1,73 kg de vapor/kg de bagazo
Costo de combustible	0,00795 \$/kg de bagazo
Costo de producción de vapor	0,004595 \$/kg de vapor
Costo de producción de un kJ de vapor	1,4281E-06\$/ kJ
Horas de generación de vapor	6 840 horas al año

3.2.3 Control de flujo de agua del atemperador y optimización de recolección de revaporizado

El flujo de agua en el atemperador puede ser controlado desde la cabina de operación de calderas de IANCEM, aquí mediante la instalación de un PLC y su respectiva programación se puede enviar la señal a una válvula de control de flujo para que esta se abra o se cierre según sean las condiciones requeridas de presión y temperatura. Este sistema de control tiene 2 componentes principales, un sensor y una válvula de control de flujo (Figura 29).



Figura 26. Sensor y válvula de control de flujo (Fuente: Digiten; CLA-VAL).

Los costos para cada componente están expresados en la Tabla 14. La mano de obra también se incluye en la inversión para esta OAE

Tabla 14. Inversión total para la optimización de control de flujo de agua en el atemperador (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN	INVERSION
Digiten G1 – 1/2" 1.5" Flujo de Agua Salón Sensor Interruptor	\$ 80
Válvula de control de flujo CLA-VAL	\$ 120
Mano de obra para programación del control	\$ 800
TOTAL	\$ 1000

Tomando en cuenta que la destrucción de exergía en el atemperador es igual a 550 kW y que con la ayuda de la OAE propuesta la eficiencia exergética aumente en 10 unidades se calculan los resultados para los indicadores económicos.

La anualidad esta expresada por la multiplicación entre la destrucción de exergía (Tabla 11) y el costo de producción de un kilo Joule de vapor. A continuación, se muestra el ahorro económico anual de este análisis.

$$\text{Ahorro económico} = 13,54 * 10^9 \frac{\text{kJ}}{\text{año}} * 1,428 * 10^{-6} \frac{\text{USD}}{\text{kJ}} = 19339,68 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

En el cálculo del valor presente uniforme se utiliza una tasa de interés del 12% y una duración del proyecto de 10 años.

$$\left[\frac{(1 + 0,12)^{10} - 1}{0,12(1 + 0,12)^{10}} \right] = 5,65$$

Por tanto, el VP para esta OAE es:

$$VP = 5,65 * 19339,68 = 109273,5 \text{ USD}$$

El VAN de este proyecto se lo calcula tomando en cuenta una inversión inicial de 1000 dólares aproximadamente:

$$VAN = -1000 + 109273,5 = 108273,5 \text{ USD}$$

Estos valores son calculados específicamente para la aplicación de un controlador y sensor de flujo en la tubería que transporta agua hacia el atemperador (figura 24, entrada 2). La TIR y la relación Costo Beneficio se calcularán en conjunto con la aplicación de los tanques para la recuperación del revaporizado. Los cálculos y el respectivo análisis para esta OAE se expresan a continuación.

En el último informe realizado por IANCEM, se determinó un total de 10 260 m³/año de condensados no recolectados. Debido a que este problema no se ha solucionado y los condensados son desechados se realiza el cálculo con respecto a la cantidad de agua perdida antes mencionada. La Ecuación 22 representa la cantidad de calor necesaria para calentar el agua de los condensados hasta su ebullición, suponiendo que estos poseen una temperatura de 80°C.

$$Q = \rho v * Cp * \Delta T$$

Ecuación 2. Calor suministrado.

Donde:

Q = Es el calor suministrado. (kJ/año)

$m = \rho v$ = densidad por volumen. Masa del agua a calentar (kg)

C_p = Es la capacidad calorífica del agua (4,186 kJ/kg-°C)

ΔT = La variación de la Temperatura

El calor suministrado en el cambio de fase se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = m * C_{lf}$$

Ecuación 3. Calor suministrado en el cambio de fase.

Donde:

C_{lf} = Calor latente de evaporación del agua (2256,5 kJ/kg)

$m = \rho v$ = densidad por volumen. Masa del agua a calentar (kg)

El calor suministrado en el sobrecalentamiento se calcula con la Ecuación 23 tomando en cuenta que la temperatura se eleva de 92,74°C hasta 390°C.

Se resumen los cálculos de estos calores en la Tabla 15. Como se menciona antes, se considera la temperatura de saturación a la presión atmosférica 78,1 kPa y 92,74°C respectivamente, una densidad a esas condiciones de 963,21 kg/m³ y un sobrecalentamiento hasta la temperatura del hogar de la caldera después del cambio de fase.

Tabla 15. Cálculo de calores (Fuente: Propia).

Calor necesario para elevar la Temperatura del agua hasta su ebullición	527 032 MJ/año
Calor del agua para el cambio de fase	22 299 939 MJ/año
Calor suministrado al vapor para sobrecalentarlo	12 297 137 MJ/año
TOTAL	35 124 108 MJ/año

Por tanto, se determina el ahorro económico para esta cantidad de calor perdido por los condensados no recuperados al año.

$$\text{Ahorro económico} = 35124108 \frac{\text{MJ}}{\text{año}} * 1,428 * 10^{-6} \frac{\text{USD}}{\text{kJ}} = 50157,22 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Los valores del valor presente y el valor actual neto para esta OAE se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 16. Valor presente y VAN para optimizar la recuperación de revaporizado (Fuente: Propia).

Valor Presente	\$ 283 388,29
Inversión*	\$ 5 000
Valor Actual Neto	\$ 278 388,29

*valor obtenido del análisis energético en 2015 por IANCEM.

Una vez obtenido los valores respectivos de VP y VAN para cada inversión se realiza una Tabla 17 con el objetivo de representar los ingresos y egresos realizados en el tiempo de vida de la aplicación de estas OAE.

Tabla 17. Ingresos y egresos en el tiempo de vida del OAE (Fuente: Propia).

AÑO	Ingresos por aplicación de sensor y control de flujo de agua	Ingresos por recuperación de revaporizado	TOTAL, DE INGRESOS
1	0	0	0
2	19339,68	50157,22	69496,9
3	19339,68	50157,22	69496,9
4	19339,68	50157,22	69496,9
5	19339,68	50157,22	69496,9
6	19339,68	50157,22	69496,9
7	19339,68	50157,22	69496,9
8	19339,68	50157,22	69496,9
9	19339,68	50157,22	69496,9
10	19339,68	50157,22	69496,9
AÑO	Egresos por combustible	Egresos por Inversiones	TOTAL, DE EGRESOS
1	40185,342	6000	46185,342
2	40185,342	0	40185,342
3	40185,342	0	40185,342
4	40185,342	0	40185,342
5	40185,342	0	40185,342
6	40185,342	0	40185,342
7	40185,342	0	40185,342
8	40185,342	0	40185,342
9	40185,342	0	40185,342
10	40185,342	0	40185,342

Se obtiene el flujo neto de efectivo mediante la resta de ingresos menos egresos (Tabla 18).

Tabla 18. Flujo neto de efectivo (Fuente: Propia).

AÑO	FLUJO DE EFECTIVO NETO
1	-46185,342
2	29311,558
3	29311,558
4	29311,558
5	29311,558
6	29311,558
7	29311,558
8	29311,558
9	29311,558
10	29311,558

Finalmente se encuentra el VAN y la TIR.

Tabla 19. VAN y TIR totales (Fuente: Propia).

VAN	TIR
\$118 031,03	63%

La relación beneficio costo se obtiene a partir del valor actual y la inversión inicial, dando como resultado un valor de \$118 031,03. De esta forma se determina que la aplicación de las alternativas de ahorro planteadas para la optimización de la línea base son rentables para la empresa.

2.2 Conclusiones

A través de los lineamientos de la norma ISO 50002 para la realización de una auditoría energética se plantearon varias oportunidades de ahorro energético para el uso de IANCEM con el fin de dar una mejora al desempeño energético. El análisis energético y exergetico permitió indagar sobre el estado del sistema de vapor y proponer diferentes alternativas para el ahorro energético.

A partir del análisis tecno económico se valida las oportunidades de ahorro energético, siendo estas viables y factibles para la empresa.

El análisis de segunda ley expresa la calidad de la energía en IANCEM. El estado del sistema de vapor está en rangos aceptables considerando el diseño y la tecnología usada en el proceso.

Las OAE planteadas son expresadas en este proyecto tomando en cuenta las posibilidades de la empresa, es decir que estas no arriesguen la calidad ni la productividad en la planta.

Los elementos del sistema de vapor del Ingenio Azucarero del Norte donde se puede realizar un análisis exergetico y así buscar soluciones para poder mejorar la eficiencia de este son: la caldera Dallas, la turbina, el atemperador y sus tuberías. De igual manera se evidencia la importancia de colocar elementos que controlen o indiquen el flujo, la presión y la temperatura que existe de todos los fluidos que estén pasando por el sistema para de esta manera identificar problemas y poder solucionarlos antes de que estos se agraven.

Los principales procesos de la fábrica para la producción de azúcar dependen de la generación de vapor, cuando existe un inconveniente en la caldera, no existe el vapor necesario para solventar el consumo de vapor de cada equipo de la planta. La generación de vapor es el corazón de la producción del azúcar en IANCEM.

Los indicadores tecno económicos como el VAN, V_p , TIR y la relación costo beneficio ayudan a determinar la viabilidad de las OAE, los resultados positivos son favorables para dar un paso en la optimización del sistema de vapor en IANCEM.

En el caso de IANCEM, si se da un tiempo de permanencia del proyecto de 10 años, la empresa podría cumplir con todas las OAE propuesta en este proyecto.

2.3 Recomendaciones

Controlar los parámetros de la combustión para mejorar la eficiencia energética de la caldera, debido a que actualmente solo se controla la apertura de los ventiladores.

Debido a la antigüedad de las instalaciones, es recomendable realizar un análisis tecno económico de una remodelación completa de la planta de elaboración de azúcar sulfatada.

Mejorar el tratamiento de los condensados provenientes de los evaporadores para evitar daños en la caldera y en las tuberías.

Revisar periódicamente el banco de tubos en la caldera debido a su acelerado deterioro.

3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lozano, M. A. (1987). *Metodología para el análisis exergético de calderas de vapor en centrales térmicas*.
- Arjona, A. (2019). *Revisión de métodos para la determinación de pérdidas y eficiencia energética en generadores de vapor*. 170.
- Zambonino Gallo, J. (2013). Análisis de alternativas para el tratamiento de aguas de industrias del ingenio azucarero del norte de IANCEM.
- IANCEM. (2019). *Historia – Azúcar Tababuela*. Azucar Tababuela. Recuperado 4 de enero de 2022, de http://www.tababuela.com/?page_id=12031
- Harris, K. N. (1967). *Model Boilers and Boilermaking*. Hemel Hempstead: Model Aeronautical Press
- Hugot, E. (1967). *Manual para ingenieros azucareros*.
- Cengel, Y. A. & Boles, M. (2019). *Termodinámica*, 9th Edición. McGraw Hill.
- Dincer, I., & Bicer, Y. (2020). *Fundamentals of energy systems. In Integrated Energy Systems for Multigeneration*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809943-8.00002-9>
- American Society for Testing and Materials. (2004). *Diámetros interior y exterior del aislamiento térmico rígido para tamaños nominales de tubos y tuberías (sistema NPS) (ASTM C585 – 90)*.
- Cortés Falcón, M., Cornes Izquierdo, Y., Alomá Vicente, I., & González Suárez, E. (2019). Evaluación Del Sistema Energético En El Central Azucarero Quintín Bandera. *Centro Azúcar*, 46(3), 66–78.
- Rodríguez, P. (1997). *Manual de cálculo rápido para la industria azucarera*.
- Escamilla, M. (2007). *Análisis Energético Integral del Ingenio Santa Teresa, S.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Escobar Vanegas, A., & Cárdenas Restrepo, D. A. (2018). Análisis Energético y Exergético de una Planta de Cogeneración del Sector Azucarero Asistida por Colectores Solares. *Grupo De Investigación En Gestión Energética*, 0(0), 1–86.
- Acedo Sanchez, J. (2003). *Control Avanzado de Procesos 1ª*. Madrid: Edición Diaz de Santos.
- Cedeño Rogger, A. (2020). Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 4(2), 50. <https://doi.org/10.33936/riemat.v4i2.2196>

Hernandez, A., Martinez, Y. & Dominguez, F. (2007). Tecnología Pinch: Introducción a la Integración Energética. Departamento de Química. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.

Abreu, M., & Villas, D. Las. (2012). Evaluación del sistema de evaporación del proceso de fabricación de azúcar en la empresa Antonio Sánchez. *Tecnología Química*, XXXII (2), 131–137. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2012.2.%x>

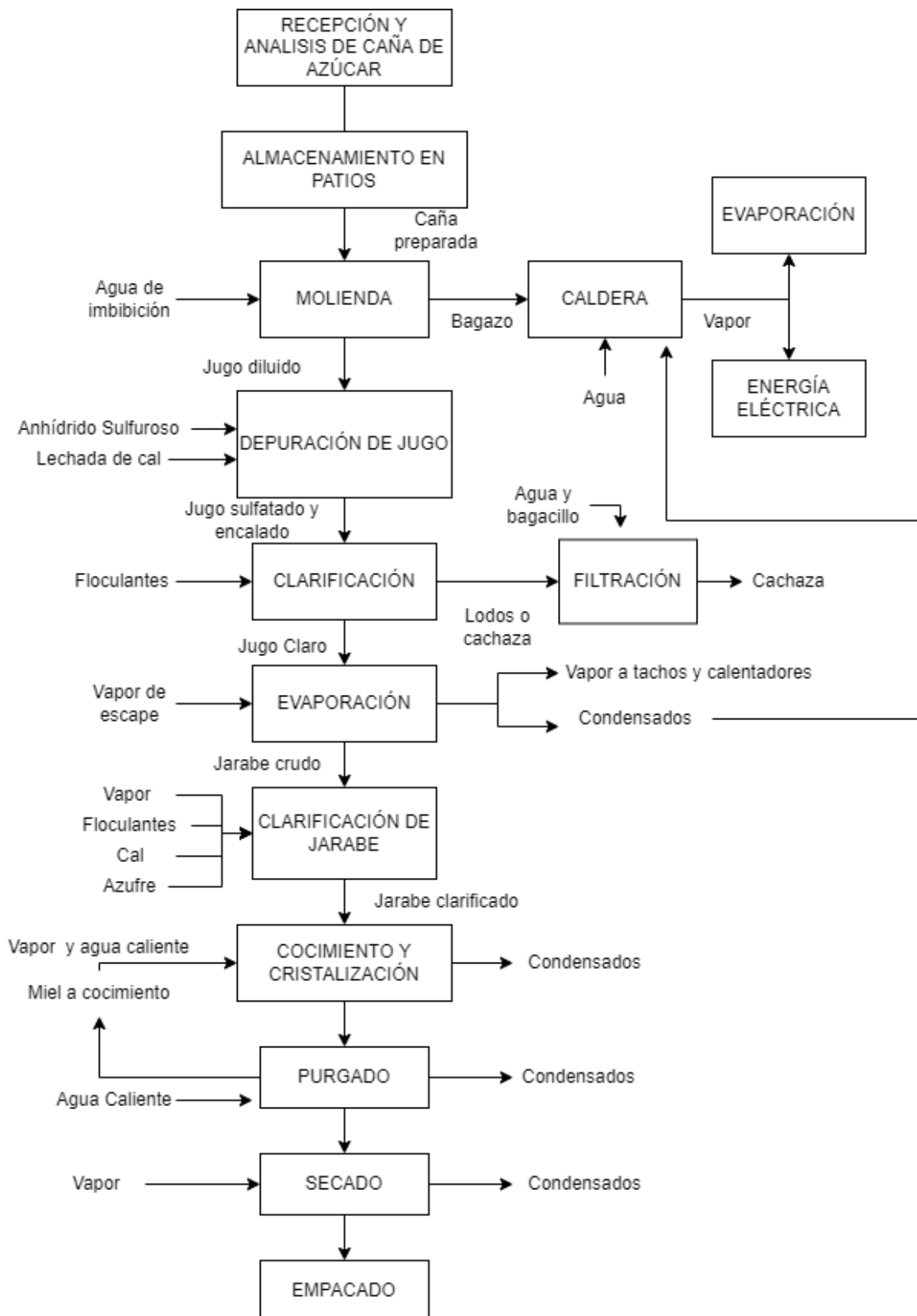
Moler, C. (2020). MATLAB (Versión R2020a). Windows. MathWorks.

NAIMA. (2012) 3EPlus (Versión v4.1). Windows. Quito: NAIMA. www.pipeinsulation.org

Blank, L. & Tarquin, A. (2006). Ingeniería Económica, 6ta Edición. McGraw Hill

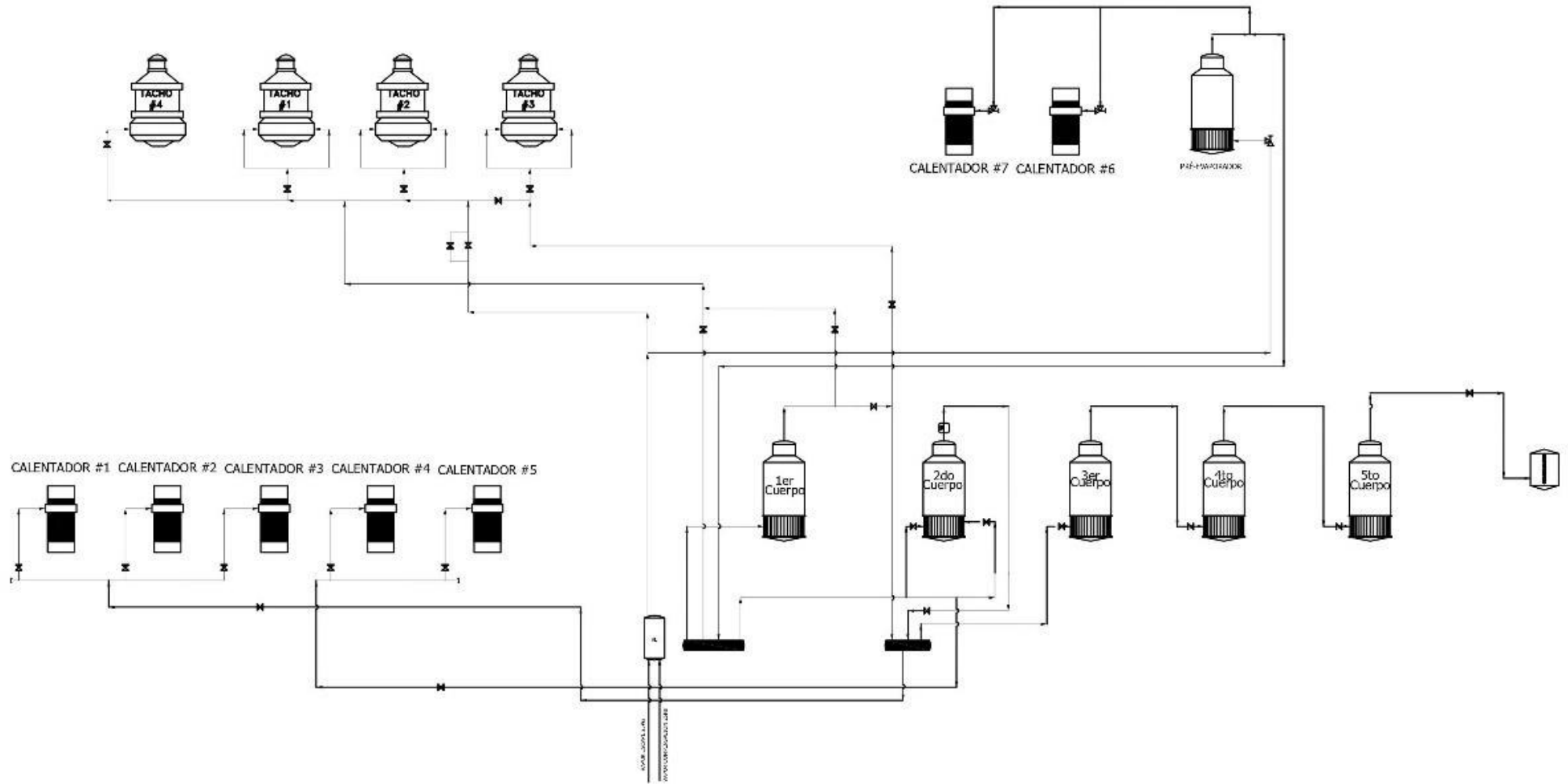
4 ANEXOS

ANEXO I. Proceso de producción de productos derivados de la caña de azúcar



(Fuente: Propia)

ANEXO III. Diagrama de distribución del vapor



(Fuente: Propia)

ANEXO IV. Registro de parámetros de la caldera

FECHA	23/11/2021							24/11/2021							25/11/2021						
	6am	7am	8am	9am	10am	12am	13am	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm
Flujo agua [m3/h]	14,739	12,51	14,3	14,572	14,89	19,96	12,29	12,21	14,39	13,476	11,19	20,2	9,13	15,11	22,21	14,43	11,5	9,072	9,353	15,48	20,33
°T agua alim. [°C]	111,28	107,49	111,23	111,28	112,3	125,11	120,2	108,84	106,42	114,85	114,82	115,5	122,8	113,5	119,3	110	114,5	115,9	107,8	108,5	123,72
h agua alim. [kJ/kg]	468	453	468	469	473	527	506	458	448	484	483	486	517	478	502	483	482	488	454	457	521
h agua a. [Btu/lbm]	201	195	201	201	203	227	218	197	193	208	208	209	222	206	216	208	207	210	195	196	224
Flujo vapor [ton/h]	27,23	26,698	24,73	26,84	26,41	25,32	26,34	25,54	26,52	26,136	26,92	25,99	24,58	27,34	22,2	25,13	25,98	23,08	23,2	24,15	25,15
°T vapor [°C]	408,5	418,18	422,99	385,15	370,8	375,74	405	391,56	380,38	373,18	408,75	393,2	384,7	412	325,1	369,5	406,9	354,5	400,9	371,2	384,45
Presión vapor [psi]	385,42	392,83	402,65	366,9	334,4	396,99	378,6	375,09	380,21	349,53	380,02	366,2	358,7	409,8	331,9	323,8	385,6	293	317,2	339,2	385,95
Presión vapor [MPa]	2,66	2,71	2,78	2,53	2,31	2,74	2,61	2,59	2,62	2,41	2,62	2,52	2,47	2,83	2,29	2,23	2,66	2,02	2,19	2,34	2,66
h vapor [kJ/kg]	3256	3277	3287	3206	3178	3181	3249	3220	3194	3181	3258	3224	3206	3262	3075	3177	3253	3147	3247	3178	3202
h vapor [Btu/lbm]	1400	1409	1413	1379	1367	1368	1397	1384	1373	1368	1401	1386	1379	1402	1322	1366	1399	1353	1396	1367	1377
Molienda caña [T/h]	66,28	68,53	51,98	64,28	35,35	3,28	52,57	61,16	65,06	43,26	60,13	50,83	65,16	69,05	43,52	56,88	56,23	39,12	50,89	65	49,97
Fibra en caña	8,62	8,91	6,76	8,36	4,60	0,43	6,83	7,95	8,46	5,62	7,82	6,61	8,47	8,98	5,66	7,39	7,31	5,09	6,62	8,45	6,50
Cantidad bagazo (T/h)	17,23	17,82	13,51	16,71	9,19	0,85	13,67	15,90	16,92	11,25	15,63	13,22	16,94	17,95	11,32	14,79	14,62	10,17	13,23	16,90	12,99
Poder calorífico	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530	3530
Eficiencia caldera	53,7	51,6	62,8	53,6	94,7	959,7	64,4	54,0	52,4	76,4	58,2	65,6	47,5	51,6	61,5	55,8	60,0	73,5	59,7	47,4	63,2

(Fuente: Propia)

