

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

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

### **ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA DE VAPOR DEL INGENIO AZUCARERO DEL NORTE**

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

**BRYAN ISRAEL OCAÑA CHAVEZ**

**bryan.ocana01@epn.edu.ec**

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

**jose.palacios@epn.edu.ec**

**DMQ, marzo 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, BRYAN ISRAEL OCAÑA CHÁVEZ 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.

---

**BRYAN ISRAEL OCAÑA CHAVEZ**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por BRYAN ISRAEL OCAÑA CHÁVEZ, 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.

BRYAN ISRAEL OCAÑA CHÁVEZ

ING. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA, Ph.D.

## **DEDICATORIA**

Este proyecto se lo dedico a mis padres, Rosa y Ruperto, los cuales sin importar las circunstancias estuvieron conmigo, en las amanecidas y en los momentos donde sentía que ya no podía seguir más, gracias por su apoyo incondicional y sus ánimos no me he rendido.

A toda mi familia que a pesar de la distancia han estado conmigo, dándome apoyo y ayudándome en lo que han podido aún con una pequeña palabra de aliento. De corazón muchas gracias.

A todas las personas que estuvieron conmigo en toda la carrera, apoyándome o simplemente compartiendo conmigo. A mis compañeros de universidad con quienes hemos compartido noches de desvelo entendiendo materias que nunca creí comprender y a Franklin Chicaiza que sin su apoyo y dedicación en el proyecto no se hubiera completado.

**BRYAN ISRAEL OCAÑA CHÁVEZ**

## **AGRADECIMIENTO**

En este pequeño espacio, quiero dar un agradecimiento a mi familia, la que siempre estuvo conmigo y siempre supieron darme una palabra de aliento cuando sentía que ya no podía más. A mis padres que amanecieron conmigo cada día de mi vida universitaria. Un agradecimiento al Ingenio Azucarero del Norte que abrió sus puertas para poder realizar este proyecto, así como a todo el personal que cedieron su tiempo en ayudar y en aportar sus conocimientos y su experiencia, siempre con una buena actitud.

Agradezco al Ing. José Luis Palacios Encalada por su dirección en este proyecto aportando sus conocimientos, sus consejos profesionales y demostrando siempre una buena actitud. Le deseo muchos éxitos en su vida profesional al igual que al Ing. Christian Tapia, docente a cargo del laboratorio de transferencia de calor.

## 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 energética y exergética.....	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
2 METODOLOGÍA .....	6
2.1 Reconocimiento de caldera en la empresa .....	7
2.1.1 Caldera Dallas.....	7
2.2 Estudio del funcionamiento del sistema de vapor .....	10
2.2.1 Tratamiento y acondicionamiento de agua .....	10
2.2.1.1 Sistema de purgas.....	11
2.2.1.2 Condensados.....	11
2.2.2 Combustión .....	12
2.2.3 Requisitos de mantenimiento.....	13
2.3 Identificación de la línea base .....	14
2.4 Recopilación histórica de datos.....	15
2.4.1 Parámetros de la generación de vapor .....	15
2.4.2 Eficiencia y consumo específico de energía para la caldera Dallas .....	16
2.5 IDENTIFICACION DE OPORTUNIDADES DE AHORRO ENERGÉTICO ..	21
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
3.2.1.1 Caldera Dallas .....	23
3.2.1.2 Turbogenerador.....	24
3.2.2 Análisis tecno económico.....	25
2.2.1 Control flujo combustible.....	26
2.2.2 Optimización de aislantes térmicos.....	27

2.3	Conclusiones.....	32
2.4	Recomendaciones.....	33
3	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
4	ANEXOS.....	36
	ANEXO I. Proceso de producción de productos derivados de la caña de azúcar ....	36
	ANEXO II. Diagrama línea base .....	37
	ANEXO III. Diagrama de distribución del vapor.....	38
	ANEXO IV. Registro de parámetros de la caldera.....	39
	ANEXO V. Comprobación de resultados de aislante térmico en Matlab .....	40
	ANEXO VI. Determinación del índice de generación .....	42
	ANEXO VII. Cálculo de valores óptimos de aislante térmico mediante el programa 3EPlus.....	43
	ANEXO VIII. Valor de pesaje para bagazo.....	46

## RESUMEN

El presente proyecto tiene la finalidad de realizar un Análisis Energético del Sistema de Vapor en el Ingenio Azucarero del Norte y a través de este ver oportunidades de ahorro energético.

El desarrollo y optimización de equipos energéticos en la industria azucarera es crucial para aumentar la productividad y reducir los costos de producción y energía, por lo que se realizaron pruebas energéticas a través de la primera ley de la termodinámica. El sistema de vapor consta de un generador de vapor que genera vapor que se distribuye directamente al turbogenerador, la menor cantidad de agua que fluye se distribuye a la planta y se utiliza para producir azúcar.

En base a la información recopilada se presentan las posibilidades de ahorro energético de la empresa, a la vez que se realiza un análisis técnico y económico de cada posibilidad de ahorro energético para comprobar su rentabilidad.

Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM) es pionero en la industria azucarera en la provincia de Imbabura con un sistema de vapor para la producción de energía. El proyecto es una recopilación de información que beneficia a la empresa en términos económicos.

Además, se presentan los procesos más importantes en la producción de azúcar sulfatada, destacando las máquinas que aprovechan el vapor producido en la caldera. Para estudiarlo se realiza un reconocimiento y levantamiento informativo de la caldera de la empresa.

La metodología utilizada en el proyecto se basa en los lineamientos de la norma ISO 50 002. En este punto, se realiza un análisis de energía en la línea base del sistema de vapor. Finalmente se proponen las posibilidades de ahorro energético con su respectivo análisis técnico y económico. Finalmente, se dan las conclusiones y recomendaciones.

**PALABRAS CLAVE:** energía, línea base, sistema de vapor, turbogenerador.

## **ABSTRACT**

The purpose of this project is to perform an energy analysis of the steam system at the Ingenio Azucarero del Norte sugar mill and, through it, to identify energy saving opportunities.

The development and optimization of energy equipment in the sugar industry is crucial to increase productivity and reduce production and energy costs, so energy tests were conducted through the first law of thermodynamics. The steam system consists of a steam generator that generates steam that is distributed directly to the turbogenerator; the smallest amount of water that flows is distributed to the plant and used to produce sugar.

Based on the information gathered, the company's energy saving possibilities are presented, and a technical and economic analysis of each energy saving possibility is carried out to verify its profitability.

Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM) is a pioneer in the sugar industry in the province of Imbabura with a steam system for energy production. The project is a compilation of information that benefits the company in economic terms.

In addition, the most important processes in the production of sulfated sugar are presented, highlighting the machines that take advantage of the steam produced in the boiler. To study it, a reconnaissance and informative survey of the company's boiler is carried out.

The methodology used in the project is based on the guidelines of ISO 50 002. At this point, a baseline energy analysis of the steam system is performed. Finally, energy saving possibilities are proposed with their respective technical and economic analysis. Finally, conclusions and recommendations are given.

**KEYWORDS:** energy, baseline, steam system, turbogenerator.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El vapor se lo utiliza como fuerza motriz por una gran parte de plantas industriales, ya que este ayuda en la transformación de la materia prima o semielaborada 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 privilegiado como nervio-motor de los distintos procesos productivos le confiere (Escamilla, 2007).

El Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM) es una compañía azucarera que radica en la provincia de Imbabura y fue fundada en 1964. A inicios de su creación, este ingenio contaba con una caldera con la capacidad de generar 25 t/h de vapor. En estos días, la caldera mencionada ha sido dada de baja, por este motivo se utiliza una caldera ensamblada por la compañía DALLAS BOILER MEXICANA con una capacidad de generación de vapor de 28 t/h. Esta caldera 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 una de las industrias más difíciles y dinámicas (Escamilla, 2007). La caña de azúcar es la materia prima de la que se extrae la máxima cantidad de sacarosa para recuperar y transformar los cristales por las corrientes térmicas que interactúan con ella. El bagazo es un subproducto de la caña de azúcar y se utiliza como combustible en un ciclo de cogeneración de energía donde las corrientes de vapor (con presiones variables) se distribuyen a lo largo del proceso de producción.

En este proyecto se realizará un análisis energético para conocer el rendimiento actual del sistema de vapor aplicando los principios de termodinámica y transferencia de calor. Como resultado, una solución de ahorro de energía factible ayuda a mejorar la eficiencia del sistema de vapor, para ahorrar combustible y reducir las emisiones. De la misma manera, las correcciones se realizarán en cada proceso al ubicar las pérdidas y anomalías de diferentes elementos que conducen al uso ineficiente de la energía térmica. A través de la implementación de medidas tecnológicas, se confirmará la viabilidad de aplicar soluciones de ahorro potenciales para optimizar su consumo.

Una gestión energética completa permite controlar los parámetros relacionados con el proceso de producción. En un ingenio azucarero, la importancia de una buena gestión energética sienta las bases para posibles mejoras y capacidad de expansión, teniendo en cuenta el consumo energético. Otro método para realizar análisis en sistemas energéticos es la exergía basada en la segunda ley de la termodinámica, que tiene como objetivo aumentar la eficiencia de los procesos industriales. Además de incorporar métodos de energía tradicionales para el análisis del balance de energía, el método de exergía aborda la pérdida de calidad de la energía en un volumen de control que no se aborda en otros métodos (Lozano, 1987).

Una auditoría energética generalmente se realiza a través de 2 métodos para recopilar y analizar el rendimiento del sistema de vapor, método directo y método indirecto. La primera es tener en cuenta la energía útil en relación con la energía que aporta el combustible. Para el método indirecto, se compara restando las pérdidas específicas del sistema de vapor al aporte de energía correspondiente al combustible. El aumento de la eficiencia del sistema de vapor incluirá la generación de energía térmica con menos combustible a través de soluciones que hagan un uso eficiente 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 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.

Realizar un análisis exergético y energético traerá soluciones y beneficios a IANCEM debido a la representación cuantitativa del rendimiento del sistema de vapor que proporciona. Además, un estudio de optimización del sistema de vapor incluyendo un análisis técnico-económico, donde la industria tendrá una mejor visión de cómo invertir en soluciones de ahorro de energía puede generar mayores ganancias para 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 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.

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 energética y exergética

Una máquina térmica tiene como fin la salida de un trabajo neto a partir de una cierta cantidad de calor suministrada al fluido de trabajo (en este caso agua). A partir de este análisis, de entradas y salidas, se puede definir la eficiencia térmica para una máquina. La forma más sencilla de representar esta eficiencia se encuentra 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 es un indicador energético de que tan bueno es el proceso de conversión de calor en trabajo. Una máquina térmica se diseña con la finalidad de convertir calor en trabajo, por tanto, el diseño está basado en mejorar esta conversión, es decir, la máquina térmica pueda generar la mayor cantidad de trabajo con poco combustible. Una mayor eficiencia significa menores gastos en combustibles por tanto menos costo de producción y menor contaminación.

De manera general cualquier máquina térmica posee eficiencias relativamente bajas, por ejemplo: Un motor común a gasolina tiene una eficiencia de alrededor de 25% (Cengel, 2012). Este valor se refiere a que el 25% de la energía química del combustible se transforma en trabajo mecánico. Otro ejemplo lo tenemos con los motores a diésel, con una eficiencia de alrededor del

40% (Cengel, 2012). Si hablamos de un valor más alto se tienen las centrales eléctricas de gas o vapor con un 60% (Cengel, 2012). De este modo, se concluye que, incluso con los valores más altos de eficiencia para maquinas térmicas, gran parte de la energía total suministrada no genera trabajo y es arrojada hacia sumideros como ríos, lagos o en la atmósfera.

Hay que entender que la eficiencia térmica está definida en base a la primera ley de la termodinámica, es decir con respecto a un balance de energía de la maquina térmica como tal, lo mismo que entra tiene que salir, ya sea en forma de trabajo o en forma de desperdicio al ambiente. Sin embargo, esta eficiencia puede ser errónea debido a que no demuestra el mejor desempeño posible que pueda tener la maquina térmica.

El concepto es más evidente cuando se tienen dos máquinas térmicas con una misma eficiencia. Considerando su eficiencia se puede decir que ambas maquinas aprovechan la misma cantidad de calor para producir el mismo trabajo, por ende, las dos tienen un desempeño igual. Sin embargo, cuando se toman en cuenta las temperaturas de sus fuentes y sumideros a la luz de la segunda ley de la termodinámica, todo es distinto en cuanto al potencial de energía que se está aprovechan (Ecuación 2) (Cengel, 2012).

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

**Ecuación 2.** Eficiencia reversible considerando la segunda ley.

Donde,  $\eta_{rev}$  es la eficiencia considerando una máquina reversible y  $T_L/T_H$  es la relación de las temperaturas del sumidero con respecto a la de la fuente. De este modo se observa que, si dos máquinas trabajan a dos temperaturas diferentes, pero arrojan sus desechos a la misma temperatura, la máquina que aproveche más la temperatura de su fuente tendrá un mejor desempeño, esto considerando que ambas tienen las mismas eficiencias (Cengel, 2012). En este análisis se concluye que la eficiencia de primera ley por sí sola no es suficiente para saber el desempeño real que una maquina puede ofrecer.

#### **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).

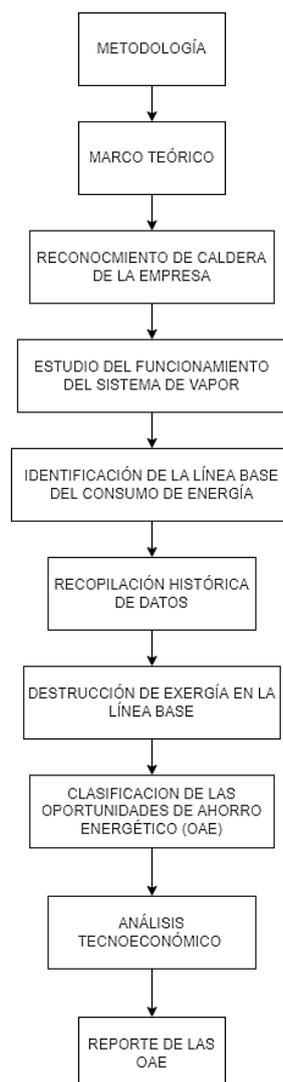
Ya que la producción de vapor es de vital importancia para todo el proceso de producción y dado que este trabajo confiere su principal atención a la generación y distribución de vapor, se tiene la necesidad de describir detalladamente el proceso de producción de azúcar sulfatada. Dentro de las etapas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

## 2 METODOLOGÍA

La implementación del proyecto se basa en las directrices que rigen la norma ISO 50002, que brinda a la industria una orientación sobre el desarrollo y la gestión del desempeño energético. Por ello, se proponen una serie de pasos para implementar la norma en el Ingenio Azucarero del Norte, teniendo en cuenta las necesidades y rumbo de la empresa.

Debido a que la metodología ha sido revisada en el apartado anterior. En este se describirá la principal fuente de generación de vapor (caldera Dallas) para brindar las condiciones y parámetros necesarios como guía para la implementación de este proyecto. Posteriormente se estudiará el funcionamiento del sistema de vapor. Para realizar la recopilación de datos históricos, primero se determinó una línea base de consumo de energía. Con base en los datos obtenidos, se examinará la eficiencia en los equipos más relevantes del sistema de vapor para determinar las oportunidades de ahorro de energía en base a estos resultados. En este proyecto no se comprende la destrucción de exergía en la línea base (Figura 1).



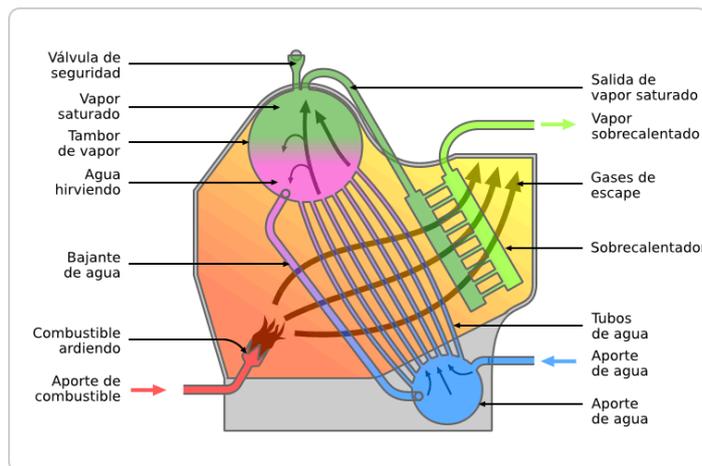
**Figura 1. Metodología.** (Fuente: Propia)

## 2.1 Reconocimiento de caldera en la empresa

### 2.1.1 Caldera Dallas

La caldera Dallas fue ensamblada y diseñada por la compañía Dallas Boiler Mexicana esta cuenta con un sistema de tratamiento y acondicionamiento del agua, sistema de alimentación de combustible, sistema de combustión de aire, sistema de generación de vapor de aire de planta, sistema de extracción de gas, sistema de control de vapor generado y sistema de purgas.

La caldera trabaja para la generación de vapor durante 24 horas, y se detiene por razones de mantenimiento cada 15 días, generándose vapor aproximadamente 6 840 horas por año. La caldera Dallas es de tipo acuatubular (Figura 2) y genera vapor sobrecalentado a 380 psi y 400°C, produciendo de 22 t/h a 26 t/h. El combustible utilizado es el bagazo de caña con un 50% de humedad.



**Figura 2.** Diagrama de caldera acuatubular (Fuente: Harris, 1997).

La caldera cuenta con un domo inferior y otro superior (Figura 3) de mediana presión, paredes aletadas, hornos con parrillas basculantes, evacuación de cenizas por tornillos sinfín, economizador, precalentador, atrapamiento de cenizas al escape con ventiladores multiciclones, ventilador forzado, ventilador sobre fuego, ventilador neumático y ventilador inducido.

El ventilador inducido es muy importante debido a que succiona la mayor parte de cenizas y bagacillo del interior de la caldera, pudiendo así optimizar la salida de gases al ambiente, bajando significativamente su temperatura. La Figura 4 muestra el exterior de la caldera donde se encuentran el economizador, precalentador, chimenea y ventiladores.



**Figura 3.** Domo superior de caldera Dallas (Fuente: Propia).



**Figura 4.** Exterior de la caldera (Fuente: Propia).

Para la alimentación de agua, la caldera cuenta con bombas eléctricas, el nivel de agua es controlado automáticamente mediante un sensor de nivel (Figura 5), cuenta con medidores de presión de vapor, temperatura y flujos de agua y de vapor.



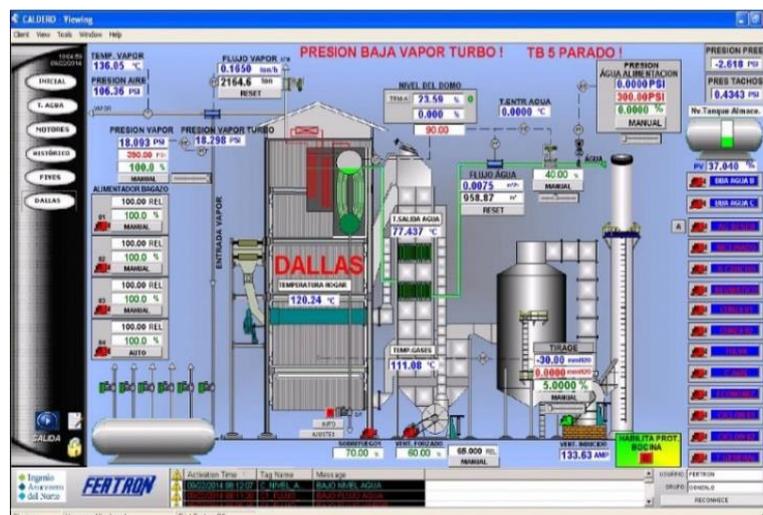
**Figura 5.** Sensor de nivel (Fuente: Propia).

La caldera es monitoreada en una cabina de control (Figura 6), desde aquí se revisan todos datos que arrojan los sensores, de este modo se controla la producción de vapor entre otros parámetros que permitirán el óptimo funcionamiento de la caldera. Entre los cuales destacan:

- Nivel del agua en el domo superior.
- Alimentación de agua: los valores de la temperatura de agua de ingreso y agua en la caldera para tomar acciones y garantizar calidad y cantidad de agua de condensados.
- Amperaje en bombas de agua de alimentación para la caldera, con opción de apagado y encendido de las bombas.
- Niveles de agua de condensados en los tanques principales de agua a la caldera.
- Presión del hogar.
- Encendido, apagado y regulación de la velocidad desde cabina de los ventiladores de: tiro forzado, tiro inducido, sobre fuego y neumático, los cuales ayudan a mejorar la combustión y extracción de gases, cenizas y bagacillo.
- La dosificación de combustible.
- Condiciones del agua de la caldera para programar purgas: continuo manual, y purga de fondo manipulada manualmente según datos de laboratorio de calidad.

El agua ingresada a la caldera proviene de los condensados de fábrica, principalmente del proceso de evaporación de agua del jugo de caña los cuales serán previamente analizados para determinar si su uso es recomendable.

En caso de un bajo nivel de agua, se compensa agua desde el río 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 río Chota la cual es tratada en varias piscinas (Figura 7) y destinada a toda la planta incluyendo a la caldera.



**Figura 6.** Interfaz para control de la caldera (Fuente: Departamento de mantenimiento IANCEM).



**Figura 7.** (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

Antes de que el agua ingrese a la caldera, debe ser tratada con productos químicos para evitar la posibilidad de incrustaciones y tratada externamente (ablandamiento) para evitar la corrosión o el desgaste de las tuberías y accesorios, manteniendo las superficies de los intercambiadores de calor en condiciones óptimas de transición del estado de calor y evitando obstrucciones.

Las condiciones que se deben cumplir para el agua de alimentación son: cómo se puede observar en la Tabla 1, la dureza debe ser lo más cercana posible entre 0 y 2 ppm. Los sólidos disueltos totales (TDS) deben ser como máximo de 2 300 ppm (Tabla 2) y se pueden ajustar o controlar en una caldera con desalinización continua y desalinización de fondo.

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

Dureza:	2 a 4 ppm (máx.)
pH:	7 a 8,5
O <sub>2</sub> 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 de la caldera dentro y fuera de esta, se usaron aproximadamente 3,5 kg/día de desoxidante (NALCO 1 721) para controlar el oxígeno disuelto y el producto de dispersión de fosfato polimérico (NALCO 1 721). NALCO 9 546 se usa como inhibidor de la corrosión. Hidróxido de sodio líquido para evitar la precipitación de carbonatos. El pH evita la formación de sales de carbonato.

### 2.2.1.1 Sistema de purgas

Las purgas son muy importantes ya que estas eliminan los sólidos solubles en agua y los lodos de la caldera. Hay dos patrones de purgas: purga lateral continua para eliminar la concentración de aceite, purga superior e inferior de espuma del domo o purga inferior para eliminar depósitos y residuos. La purga de fondo se realiza dos veces por turno y al menos una vez al día para mantener niveles que no excedieran las 2 300 ppm, según los valores de TDS.

### 2.2.1.2 Condensados

El retorno de condensado (Figura 8) se midió en relación con la alimentación de la caldera y promedió 14,5 t/h. Este valor muestra que el vapor generado en la caldera vuelve al original en menor cantidad debido a las diferentes pérdidas durante la entrada al evaporador primario después de pasar por la turbina generadora. La Figura 9b muestra la línea principal de condensado del evaporador primario.



**Figura 8.** Condensados (Fuente: Propia).

El pre-evaporador (Figura 10) aprovecha todo el vapor que aún está sobrecalentado saliendo del generador de turbina, su condensado es captado y devuelto a la caldera, además, el vapor extraído del jugo de caña también es condensado y devuelto a la caldera sin pasar a través del primer sensor de conductividad. Se utilizan unas 40 toneladas mensuales para recarga y alimentación para iniciar o empezar con la molienda, sin embargo, dado que toda el agua contenida en la caña se utiliza en el proceso y se recicla a la caldera, es posible que se requiera menos agua.



**Figura 9.** (a) Bombas de condensado a la caldera (b) Tubería principal de condensados del pre-evaporador (Fuente: Propia).



**Figura 10.** Pre-evaporador (Fuente: Propia).

### 2.2.2 Combustión

Los parámetros de combustión se muestran en la Tabla 3. Después de la molienda del bagazo y de llevarlo a la caldera, su composición es casi como se describe en la Tabla 4. Los parámetros de los gases de escape se presentan en la Tabla 5.

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

Volumen del hogar	17m <sup>3</sup>
Presión necesaria	0,2 mmH <sub>2</sub> 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
<b>Composición Química</b>	
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 <sub>2</sub> O
Oxígeno O	4%
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	12%
Monóxido de carbono	1 144 ppm
La operación de la caldera	380 psi, 400°C
Flujo de gases	101 233 m <sup>3</sup> /h seco
Material particulado	387 mg/ Nm <sup>3</sup>

### 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 y en consecuencia falla por abrasión (Figura 11a), también se revisa el banco de tubos de la pantalla de agua, 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 11b) y válvulas de despresurización rápida, sin mencionar el control de la lubricación de las bombas de agua a los tanques de almacenamiento.



**Figura 11.** (a) Falla por abrasión (b) Válvula de seguridad domo superior. (Fuente: Propia)

### 2.3 Identificación de la línea base

El diagrama base se proporciona en el ANEXO II. La instalación de vapor (Figura 12a) trabaja con producción de vapor en la caldera, es decir, las 24 horas del día con descansos cada 15 días. Los perfiles de alta presión y temperatura ingresan al generador de turbina con una potencia nominal de 2 MW (Figura 12b). El vapor que sale de la turbina tiene una presión de 20 psi a 25 psi y una temperatura de unos 200°C; A través de la cámara de recocido, se baja la temperatura del vapor mezclándolo con agua a 80°C para su saturación y envío al pre-evaporador.

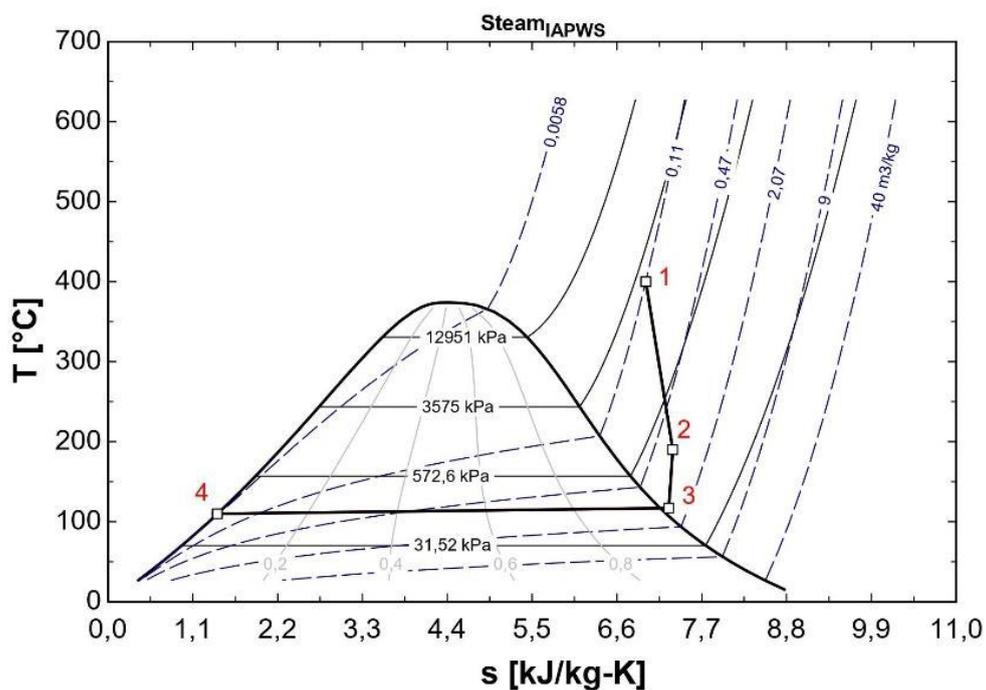


**Figura 12.** (a) Sistema de vapor (b) Turbogenerador (Fuente: Propia).

Cuando el vapor del turbogenerador no está lo suficientemente presurizado (para la producción normal de azúcar), el vapor generado pasará a través de una válvula de alivio de presión para entregar 1 tonelada de vapor por hora al proceso. Se utilizan dos válvulas de alivio de presión de 380 psi a 25 psi para liberar la presión y la temperatura es de 135°C. Este requisito de compensación ocurre solo cuando la presión de la caldera es superior a 350 psi y la presión previa del evaporador es menor a los 20 psi.

El pre- evaporador recibe todo el vapor del generador del turbogenerador y su condensado se devuelve a la caldera. También hay jugos claros que incluyen jarabe y agua. Este jugo se calienta y se transfiere a otros evaporadores donde se consumirá el vapor generado por el jugo calentado, este efecto se mantiene en los cuatro equipos hasta que el último equipo tuvo un sistema de vacío. Este proceso se conoce como evaporación multi efecto (Zambonino, 2013) y puede extraer entre 44% y 48% del agua presente en el jugo de caña de azúcar. Además de este proceso, el vapor del pre- evaporador se utiliza en: tanques 1 a 4 y cristalizadores 1 a 7. Por lo tanto, esta ruta de vapor de jugo no se incluirá en la ruta de análisis. El ANEXO III presenta esta hoja de ruta.

El diagrama de Temperatura – Entropía en el ciclo termodinámico de la línea base se lo puede apreciar en la Figura 13. Donde el punto 1 hace referencia a la generación de vapor, en el punto 2 se representa la caída de presión por el paso del flujo por la turbina. El punto 3 indica la reducción tanto de temperatura como de presión debido al atemperador y su entrada al pre- evaporador. El punto 4 representa el retorno de los condensados a la caldera



**Figura 13.** Ciclo termodinámico de la línea base de IANCEM (Fuente: Propia).

## 2.4 Recopilación histórica de datos

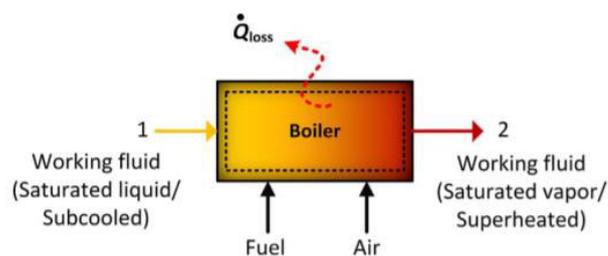
### 2.4.1 Parámetros de la generación de vapor

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 recopilaron 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.

### 2.4.2 Eficiencia y consumo específico de energía para la caldera Dallas

La caldera no es un dispositivo generador de trabajo, por ello se supone que una caldera es adiabática (sin pérdidas de calor) (Dincer, 2020). En la Figura 14 está representada una caldera con sus respectivas entradas y salidas y pérdidas de calor asociadas al proceso.



**Figura 14.** Esquema básico de una caldera (Fuente: Dincer, 2020).

Los indicadores energéticos tales como la eficiencia y el consumo específico de energía son indispensables para el correcto análisis del sistema de vapor. Se realiza los cálculos de los indicadores energéticos antes mencionados para la caldera Dallas, de esta forma se puede conocer el estado de la caldera y obtener un análisis basado en el cálculo de estos.

Para la obtención del consumo específico de energía es necesario obtener todas las variables de la Ecuación 3 (Cengel, 2019).

$$CE = \frac{\eta_g Q_i}{h_v - h_{aa}}, \quad kgv/kgc$$

**Ecuación 3.** Consumo específico de combustible.

DONDE:

$CE$  Consumo específico de combustible.

$\eta_g$  Eficiencia del generador de vapor.

$Q_i$  Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)

$h_v$  Entalpia del vapor a la presión de trabajo (kJ/kg)

$h_{aa}$  Entalpia del agua de alimentación (kJ/kg)

La eficiencia del generador de vapor se calcula mediante el método directo (Ecuación 4). El valor se obtiene utilizando los datos de mediciones individuales realizadas cada hora en un turno de 7 horas durante 3 días en dos distintas semanas, con un total de 42 mediciones de Presión, temperatura de vapor y de agua, flujo de vapor y flujo de combustible.

$$\eta_g = \frac{m_v(h_v - h_{aa})}{m_c PCS}$$

**Ecuación 4.** Eficiencia del generador de vapor (método directo).

DONDE:

$m_v$  Flujo de vapor (tv/h)

$h_v$  Entalpía del vapor a la presión de trabajo (kJ/kg)

$h_{aa}$  Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg)

$m_c$  Flujo de combustible (tc/h)

Las entalpías de vapor de salida y de agua de alimentación son calculadas 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. Teniendo una considerable muestra de datos el promedio de las temperaturas para el vapor y el agua son 390°C y 114°C respectivamente. Del mismo modo para la presión de trabajo se obtiene un promedio de 365 psi.

El valor del poder calorífico superior (PCS) se considerará del último análisis realizado por la empresa al bagazo, obteniendo como resultado un valor de 8 211 kJ/kg (Enríquez, 2015).

El flujo de vapor es medido a la salida de la caldera, obteniendo un promedio de 25,5 t/h de vapor. En la Tabla 6 se encuentra un resumen de los datos utilizados y sus propiedades termodinámicas.

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

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Flujo agua	14,49	m <sup>3</sup> /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

El bagazo de la caña de azúcar es el combustible utilizado en el proceso. Cabe aclarar que la empresa no posee una medición exacta de la cantidad de bagazo que ingresa a la caldera. Por este motivo se realiza un estimado tomando en cuenta como punto de partida los datos de las toneladas de caña molida por cada hora.

Desde el punto de vista de la producción de vapor se puede considerar varios factores que influyen tanto en el poder calorífico y el flujo de bagazo que ingresa a la caldera. El factor más importante que afecta al rendimiento de este combustible es su humedad, según (Hugot, 1963) la humedad del bagazo ( $\omega$ ) está dentro del 42% al 48%. Para diferentes tipos de cálculos como el de este trabajo es correcto asumir una humedad del 45%. Sin embargo, en un estudio realizado por la misma empresa en el año 2015 se estima una humedad del 50%. Además del agua, el bagazo posee una cierta cantidad de sólidos insolubles ( $D$ ) que varían del 2% al 5%. De este modo se obtiene la Fibra dentro del bagazo (Ecuación 5), la cual varía del 47% al 56%.

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

**Ecuación 5.** Fibra dentro del bagazo.

Para obtener la cantidad total de bagazo ( $B$ ) también se considera la fibra dentro de la caña ( $f$ ) la cual está entre el 12% al 14%. Se relaciona tanto la fibra del bagazo como la fibra de la caña y se obtiene la Ecuación 6 (Hugot, 1963) tomando en cuenta 100 partes de caña.

$$100f = B * F$$

**Ecuación 6.** Fibra dentro de la caña.

Despejando se obtiene la Ecuación 7:

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

**Ecuación 7.** 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.

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

De esta forma se calcula la eficiencia de la caldera con la Ecuación 4:

$$\eta_g = \frac{25,5 (3217,46 - 480,57) \text{kJ/kg}}{14,72 * 8210,78 \text{ kJ/kg}} = 0,5774$$

En el cálculo del consumo específico de energía se utiliza la Ecuación 3 y se toma como referencia el promedio de los datos obtenidos en campo la última semana de noviembre y la primera del mes de diciembre del 2021.

$$CE = \frac{0,5774 * 8210,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(3217,46 - 480,57) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 1,732 \text{ kgv/kgc}$$

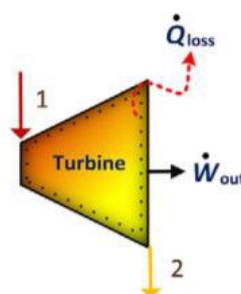
Obteniendo una eficiencia de la caldera de 57,74% y un consumo específico de energía de 1,732 kgv/kgc. Estos valores tendrán una discusión más extensa en los próximos apartados.

### 2.4.3 Eficiencia del turbogenerador

El turbogenerador o turbina es una máquina que genera trabajo mediante el paso de un fluido y su expansión. El fluido ingresa a la turbina con una alta entalpia y sale de ella con menor entalpia. Hay dos clases de turbinas: de vapor y de gas. IANCEM cuenta con una turbina de vapor con la capacidad de generar 2 MW de energía. El trabajo mecánico realizado por la turbina es máximo cuando el fluido se expande isentrópicamente, además cuando su estado inicial es adiabático en comparación a su salida, es decir, no existe una transferencia de calor entre ambos puntos (Dincer, 2020).

Para representar su eficiencia partimos de que una turbina ideal realiza una expansión isentrópica del fluido que pasa por ella, de esta forma se tendrá un proceso isentrópico por ende una eficiencia isentrópica (Dincer, 2020).

La eficiencia de primera ley de una turbina (Figura 15) permite identificar el nivel de rendimiento y cuantificar sus pérdidas por fricción, calor y perdidas por las irreversibilidades. Por otro lado, su eficiencia exergética relaciona el trabajo producido y la exergía consumida (Dincer, 2020).



**Figura 15.** 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. Del mismo modo se muestran sus propiedades termodinámicas.

**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

En el caso de una turbina es difícil no considerar sus irreversibilidades, por tanto, para obtener una eficiencia de primera ley cercana a la realidad se define una turbina adiabática a partir de las consideraciones del trabajo útil producido y las entradas de esta. La producción útil de la turbina se ve reflejada en el movimiento mecánico de su eje. La variación de energía en sus entradas es la disminución de esta debido al paso del fluido a través de la turbina (Dincer, 2020). Tomando en cuenta esta definición se considera la Ecuación 8 (Dincer, 2020).

$$\eta_{Turbine} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{m}(h_v - h_{v,s})}$$

**Ecuación 8.** Eficiencia energética de la turbina.

DONDE:

$\eta_{Turbine}$  = Eficiencia energética de la turbina (kW).

$\dot{m}$  = Flujo másico en la turbina (kg/s).

$h_v - h_{v,s}$  = Diferencia de entalpias. Entrada menos la salida, respectivamente (kJ/kg).

Como se ve en el ANEXO IV, el trabajo útil de la turbina producido en IANCEM es de 1.4 MW, a partir de estos parámetros y con el uso de la Ecuación 8 se realiza el cálculo de la eficiencia de la turbina para su respectivo análisis.

$$\eta_{Turbine} = \frac{1400 \text{ kW}}{7,08 \text{ kg/s} (3217,46 - 2868,82) \text{ kJ/kg}} = 56,69 \%$$

Obteniendo un valor de 56,69% de eficiencia. El valor obtenido recibirá un análisis de su veracidad en base a trabajos realizados por otros autores. Además, se presentarán alternativas para aumentar su valor.

## 2.5 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. Sistema de medición del bagazo que ingresa a la caldera Dallas.

Los datos de caña son tomados en base a la capacidad de carga de cada camión que ingresa a los patios de la empresa. Esta forma de medición es empírica e imprecisa dándole poca importancia a esta información la cual es utilizada para calcular el flujo de caña en Toneladas por hora que ingresara a la molienda.

El problema de la falta de precisión con los valores de caña ingresada a los patios deriva en la necesidad de mediciones sobre la cantidad de combustible (bagazo) que ingresa a la caldera teniéndose una combustión incontrolada debido a que el flujo de combustible es estimado a partir de los datos de caña molida por hora. Es por lo que se propone un sistema de medición del bagazo que ingresa a la caldera a través de basculas de precisión la cual está compuesta por rodillos galvanizados y una estructura de acero capaz de soportar altas cargas para flujos continuos (Figura 16).



**Figura 16.** Básculas de precisión (Fuente: Arcoelectrónica).

De esta forma se pretende optimizar la combustión en la caldera debido a que se podrá tener un control del combustible ingresado, facilitando así futuros análisis y la posibilidad de encontrar la mejor eficiencia para la caldera mediante la variación controlada del flujo de combustible.

## 2. Optimización de los aislantes térmicos en ciertos trayectos de la tubería de vapor.

En la empresa se encontraron algunas secciones de tubería que carecen de aislantes térmicos (Figura 17). La adición de aislantes térmicos en las tuberías disminuirá las pérdidas de calor maximizando la resistencia térmica total (Incropera y Dewitt, 2007). Para que este sea óptimo es necesario identificar los efectos colaterales que conllevan un incremento de espesor en sistemas radiales (tuberías). El aspecto económico es uno de los factores a considerar, es por este motivo que se buscó el espesor del aislante térmico en base al costo mínimo, sin dejar de lado el ahorro energético aportado a la empresa.



**Figura 17.** Sección de tubería sin la presencia de aislante térmico (Fuente: Propia).

El aislante térmico que se recomienda adicionar será del mismo material que se está utilizando en las secciones que si poseen dicho elemento (lana mineral). Para encontrar el valor óptimo de las tuberías mediante ecuaciones de resistencia térmica, se utilizó el programa Matlab (Moler, C., 2020). Para corroborar y además seleccionar un espesor normalizado por la ASTM C585, se realizó una comparación de los datos obtenidos con los entregados por el programa 3EPlus (NAIMA, 2012) el cual va a trabajar con dicha norma.

En ciertas secciones donde se deben manipular o realizar mantenimiento preventivo la empresa ha colocado cubiertas aislantes removibles (Figura 18). Estas tienen como ventaja el poder acceder a las secciones protegidas cada que se requiera sin la necesidad de dañar al aislante. Al ser fabricadas con los mismos materiales que los aislantes térmicos convencionales no presentan diferencias en términos de ahorro energético. La desventaja entre esta y una convencional es su costo.



**Figura 18.** Aislante térmico removible en tubería cercana al turbo (Fuente: Propia).

### 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 Tabla 8. Estos valores serán analizados tomando como base los conceptos de la primera y segunda ley de la termodinámica.

**Tabla 8.** Resumen de cálculos obtenidos (Fuente: Propia).

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Eficiencia térmica de la caldera	58,86	%
Eficiencia del turbogenerador	56,69	%

##### 3.2.1.1 Caldera Dallas

La eficiencia de la Caldera Dallas encontrada es del 57,74% con un consumo específico de energía de 1,73 kgv/kgc. Este valor calculado para IAMCEN es comparado con el obtenido en el estudio realizado por (Cortés, M et al, 2019) donde evaluaron al sistema energético en el Central Azucarero Quintín Bandera en Cuba obteniendo un valor de 2,38 kgv/kgc, con un rendimiento de la caldera del 78%.

Por otro lado, (Escamilla, 2007) determino un rendimiento de la caldera del Ingenio Santa Teresa de Guatemala del 51,9% y para este un consumo específico de energía de 1,428 kgv/kgc.

De igual forma, (Rodríguez, 1997) en su Manual de cálculo rápido para la industria azucarera realiza una tabla de consumo específico de energía, tomando en cuenta un rango de parámetros de presiones, temperatura, eficiencia de calderas, etc.

Tomando en cuenta los parámetros obtenidos de presión, temperatura de vapor y de agua, humedad y PCS del bagazo se determina con el ANEXO IV un índice de generación de 2,71 kgv/kgc para la caldera Dallas, un valor alejado del calculado. Sin embargo, se toman rendimientos nominales del 65% al 80% valores que superan al valor calculado. El consumo de vapor de la caldera estará regido a la demanda exigida por el turbo, para el caso de IANCEM, el turbo tiene una capacidad de generación es de 2MW, sin embargo, genera alrededor de 1,4 MW, esto significa que la generación de vapor es baja para que el turbogenerador logre alcanzar su valor nominal de generación eléctrica.

Con base a lo anteriormente expuesto, se verifica que el valor obtenido de C.E. de 1,732 kgv/kgc con una eficiencia de 57,74% se encuentra dentro del rango de calor específico reportado por otros autores.

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.

### 3.2.1.2 Turbogenerador

Las eficiencias energéticas del turbogenerador son del 56,7%. Los valores de las eficiencias para el turbo dependen de las áreas de flujo, la razón de sus velocidades, la condición del vapor, las etapas de la turbina y sus diámetros. Sin embargo, para una mejor medición de la eficiencia de una turbina se hace uso de la Ecuación 9, la cual hace referencia a la tasa de calentamiento (Heat Rate). Esta ecuación está definida como la cantidad de calor necesaria por la turbina para la producción de 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 9.** 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 9. 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.

### 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 10 (Blank & Tarquin, 2016):

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

**Ecuación 10.** 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 11 (Blank & Tarquin, 2016):

$$VAN = -I_0 + VP$$

**Ecuación 11.** 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 entalpia del vapor a la presión y temperatura de generación para el caso de IANCEM este valor es de 3217,46 kJ/kg.

**Tabla 9.** Costos energéticos (Fuente: Propia).

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

## 2.2.1 Control flujo combustible

Para el uso de la Ecuación 10 del valor presente uniforme primero se requiere analizar el factor de valor presente de serie uniforme. Para este caso se utiliza una tasa de interés del 12% y una duración del proyecto de 10 años.

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

Debido a la dificultad de obtener las pérdidas de combustible, ya que esta no se puede cuantificar y esto es lo que se espera lograr medir, se procedió a tomar como referencia la cantidad de condensados no recolectados que, en el último informe realizado por IANCEM, se determinó un total de 10 260 m<sup>3</sup>/año. La Ecuación 12 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.

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

**Ecuación 12.** 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)

$\Delta T$  = La variación de la Temperatura

El calor suministrado en el cambio de fase se calcula con la Ecuación 13:

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

**Ecuación 13.** 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 13 tomando en cuenta que la temperatura se eleva de 92,74°C hasta 390°C.

En la Tabla 10 se resume los valores obtenidos de los calores. Se considera la temperatura de saturación a la presión atmosférica 92,74°C y 78,1 kPa respectivamente, una densidad de 963,21 kg/m<sup>3</sup> y un sobrecalentamiento hasta la temperatura del hogar de la caldera después del cambio de fase.

**Tabla 10.** 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
<b>TOTAL</b>	<b>35 124 108 MJ/año</b>

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

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

Por tanto, el VP para esta OAE es:

$$VP = 5,65 * 50157,22 = 283388,29 \text{ USD}$$

En el ANEXO VII se puede observar una cotización que se realizó sobre las básculas de precisión, las cuales se encargarían de determinar el peso del bagazo. Para la demanda que la empresa necesita, el valor es de \$ 3 270,40. Con el vapor presente obtenido en la Tabla 10 se procede a encontrar el VAN de esta OAE.

$$VAN = -3 270,40 + 283388,29 = 280 118,89$$

Al obtener un valor positivo de \$280 118.89, se deduce que este proyecto es económicamente viable.

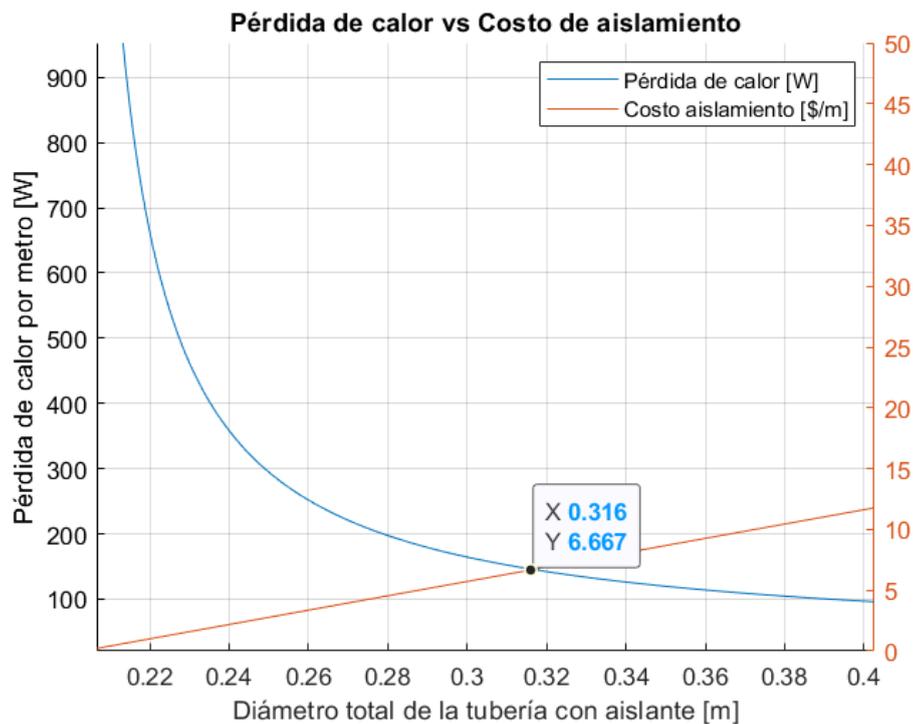
## 2.2.2 Optimización de aislantes térmicos

El estudio se realizó para dos tramos: de la caldera al turbo y a la salida del turbo, teniendo un diámetro nominal de 8 y 16 pulgadas respectivamente. Para esta OAE se consultó de antemano el costo que tiene el colocar un aislante térmico en las tuberías en la Tabla 11 se encuentran estos valores. En el ANEXO V se puede apreciar el código realizado en Matlab donde, a través de resistencias térmicas se encontró el espesor del aislante térmico. Como método de comparación se utilizó el programa 3EPlus (ANEXO VII) el cual, bajo la norma ASTM C585 da un espesor que se puede conseguir en el mercado. En las Figuras 19 y 20 se observan las

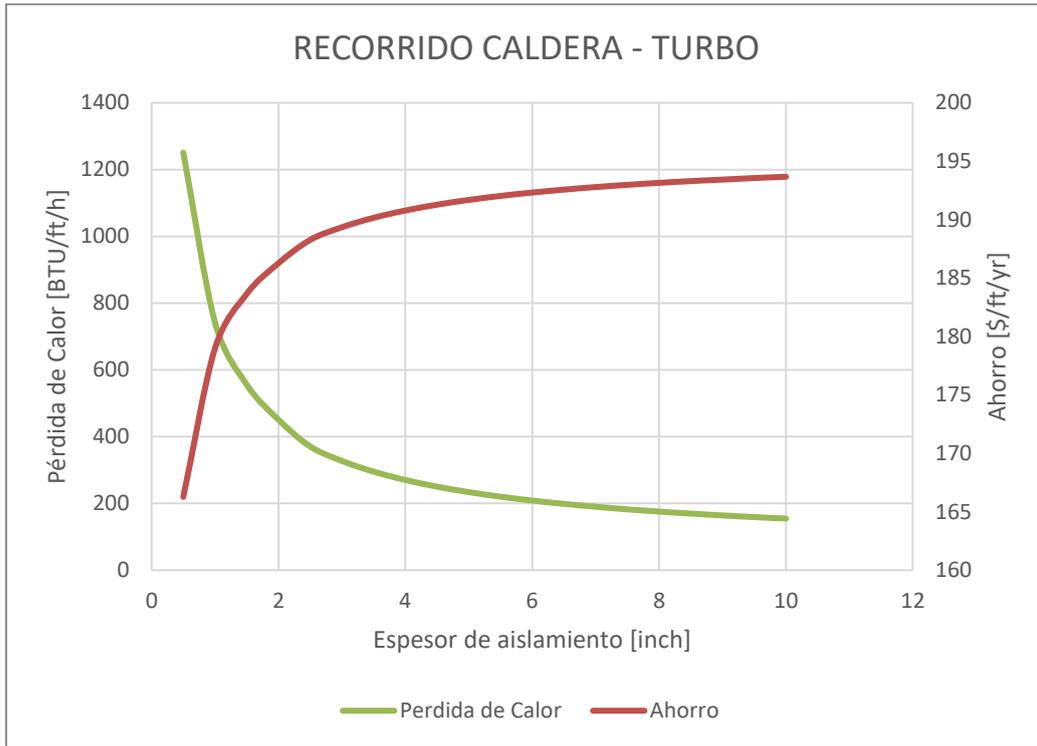
curvas obtenidas en Matlab y 3EPlus respectivamente en el caso de la tubería que va de la caldera al turbo, mientras que en las Figuras 21 y 22 se observa para el recorrido a la salida del turbo.

**Tabla 11.** Costo unitario para la instalación de aislante térmico en tuberías (Fuente: CYPE Ingenieros, S.A.).

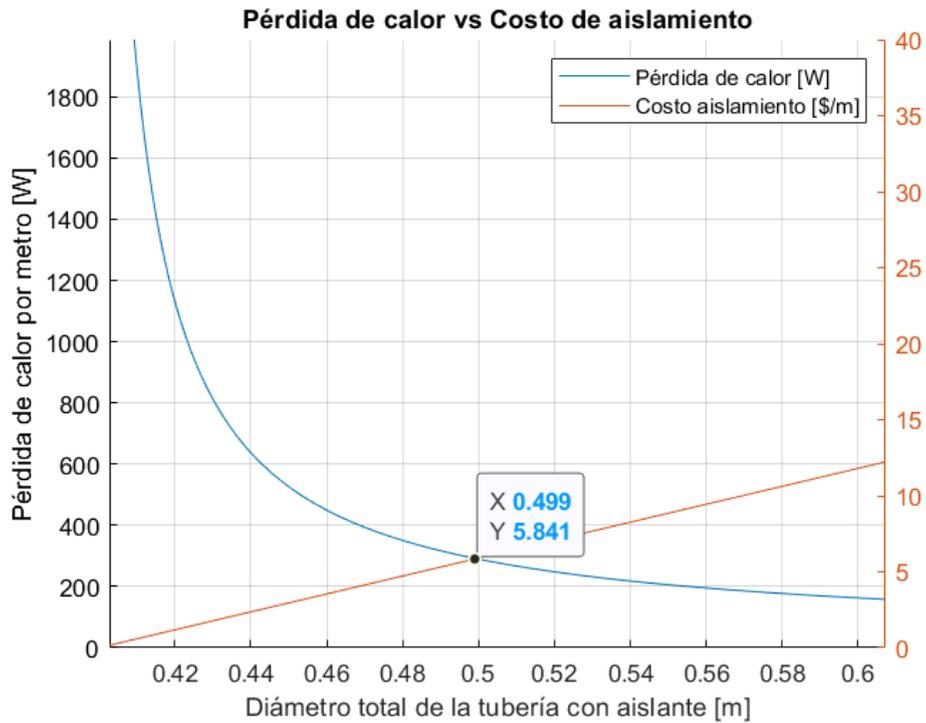
Descripción	Costo unitario
<b>Materiales</b>	
Coquilla de lana mineral, con un corte longitudinal para facilitar su montaje, con uso donde se requieran altas prestaciones térmicas.	40,82 USD/m
Lámina de aluminio de 0,6 mm de espesor, colocada, bordeada, solapada y remachada para recubrimiento de tuberías previamente aisladas.	64,21 USD/m <sup>2</sup>
<b>Mano de obra</b>	
Colocador de aislantes.	8,40 USD/h
Ayudante colocador de aislantes	5,24 USD/h
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 118,67</b>



**Figura 19.** Pérdida de calor vs Costo de aislamiento (Recorrido: Caldera - Turbo) (Fuente: Propia).



**Figura 20.** Pérdida de calor vs Costo de aislante (Recorrido: Caldera - Turbo)  
(Fuente: Propia).



**Figura 21.** Pérdida de calor vs Costos de aislamiento (Recorrido: Salida del turbo)  
(Fuente: Propia).



**Figura 22.** Ahorro económico por espesor de aislante térmico (Recorrido: Salida del turbo) (Fuente: Propia).

En las Tablas 12 y 13 se realiza una comparación del aislante obtenido en ambos programas. Como se puede apreciar, el rango de valores es muy cercano entre sí por lo que se podría validar el programa realizado. Pero al ser el espesor del programa 3EPlus normalizado, se trabajará con este para conocer otros datos relevantes a la ganancia que existe al colocar un aislante. Para el caso de IANCEM, el espesor óptimo del aislante térmico es de 1.5 pulgadas para ambos tramos.

**Tabla 12.** Comparación de resultados (Recorrido: caldera – turbo) (Fuente: Propia).

Software Utilizado	Esesor obtenido	Pérdida de Calor	Costo de aislamiento
	[inch]	[BTU/hr/ft]	[\$/ft]
MATLAB	2.22	512.12	21.86
3EPlus	1.5	555.7	13.88

**Tabla 13.** Comparación de resultados (Recorrido: salida turbo) (Fuente: Propia).

Software Utilizado	Esesor obtenido	Pérdida de Calor	Costo de aislamiento
	[inch]	[BTU/hr/ft]	[\$/ft]
MATLAB	1.82	1024	19.15
3EPlus	1.5	981.6	24.52

**Tabla 14.** Selección del aislamiento térmico óptimo para el tramo de la caldera al turbo.  
(Fuente: Propia)

Espesor de Aislamiento Variable	Temperatura de la Superficie	Pérdida de Calor	Eficiencia	Costo Combustible	Ahorro
[inch]	[°F]	[BTU/hr/ft]	[%]	[\$/ft/yr]	[\$/ft/yr]
Bare	730.3	7906		197.53	
0.5	420.3	1251	84.18	31.26	166.27
1	290.3	742.1	90.61	18.54	178.99
1.5	238.1	555.7	92.97	13.88	183.65
2	207.3	450.8	94.3	11.26	186.27
2.5	182.9	370.5	95.31	9.26	188.27

**Tabla 15.** Selección del aislamiento térmico óptimo para el tramo de la salida del turbo.  
(Fuente: Propia)

Espesor de Aislamiento Variable	Temperatura de la Superficie	Pérdida de Calor	Eficiencia	Costo Combustible	Ahorro
[inch]	[°F]	[BTU/ft/yr]	[%]	[\$/ft/yr]	[\$/ft/yr]
Bare	729.9	14470		361.49	
0.5	431.6	2228	84.6	55.67	305.82
1	311.2	1361	90.59	34.01	327.48
1.5	253	981.6	93.22	24.52	336.97
2	220.3	782.6	94.59	19.55	341.94
2.5	198.2	653.1	95.49	16.32	345.17

El costo del aislante para ambos casos y el periodo de recuperación de estos se pueden apreciar en la Tabla 16 y 17. Como se puede apreciar en las Tablas, para aislar 1 ft de la tubería que va desde la caldera al turbo, le tomará a la empresa 1 mes con 6 días volver a recuperar su inversión. Lo mismo tomará en recuperar al cubrir 1 ft de la tubería que va a la salida del turbo. Por lo tanto, es viable la aplicación de esta OAE.

**Tabla 16.** Costo del aislante y periodo de recuperación para tramo de la caldera al turbo.  
(Fuente: Propia)

ESPESOR	COSTO AISLANTE	PERIODO DE RECUPERACIÓN
[inch]	[\$/ft]	[yrs]
1.5	13.88	0.1

**Tabla 17.** Costo del aislante y periodo de recuperación para tramo de la salida del turbo.  
(Fuente: Propia)

ESPESOR	COSTO AISLANTE	PERIODO DE RECUPERACIÓN
[inch]	[\$/ft]	[yrs]
1.5	24.52	0.1

## 2.3 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.

Las eficiencias de primera y segunda ley para la caldera están en los rangos aceptables de calderas bagaceras. Sin embargo, estos pueden mejorar con la ayuda de las oportunidades de ahorro energético.

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.

Como se puede evidenciar en este proyecto, el conocer el flujo de vapor, combustible y agua en las diferentes secciones del sistema ayudan a lograr economizar costos por los mismos. Es por esto por lo que el uso de PLC's para su regulación e inspección son muy importantes.

Un ingenio debe encontrar la forma de operar más tiempo y con una mayor eficiencia. La correcta instrumentación para el control de flujos permite saber la cantidad de materia que está pasando por cada una de las tuberías de mayor relevancia para el proceso de generación de vapor. Controlar los distintos parámetros de flujo, presión y temperatura permitirán una mayor eficiencia y mayores utilidades para la empresa.

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.

Como se puede apreciar en la figura 17, las tuberías que no poseen aislante térmico presentan una gran pérdida económica para la empresa, por lo que un aislante evitaría dichas pérdidas. El espesor normalizado dado gracias al precio del combustible empleado es de una pulgada y media. Este valor, de ser expedido, representaría una pérdida económica, esto debido a sus costos de instalación como del producto mismo demostrando así la importancia de hacer este estudio.

## 2.4 Recomendaciones

El uso de cubiertas aislantes removibles, en elementos del sistema de vapor donde exista una importante fuga térmica como en válvulas, en la sección inferior de la caldera, bombas de condensado y demás secciones aumentaría la eficiencia del sistema.

En todos los pisos de la caldera se puede observar la presencia del bagazo que cae en todo el proceso, se recomienda buscar una alternativa para poder evitar estas caídas ya que el proceso impide poder medir al mismo en todo su trayecto para determinar con precisión cuánto de combustible se está perdiendo bajo este problema.

El aislante en todo el camino donde van los operarios sería indispensable, ya que al recorrer la caldera se siente un calor sofocante el cual en ciertos trayectos no ayudarían al factor económico, pero si al humano ya que, al estar los caminos tan estrechos, podría existir problemas a la salud, el más destacado, quemaduras.

Revisar los aislantes alrededor de la caldera para evitar las pérdidas continuas de calor.

### 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](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>

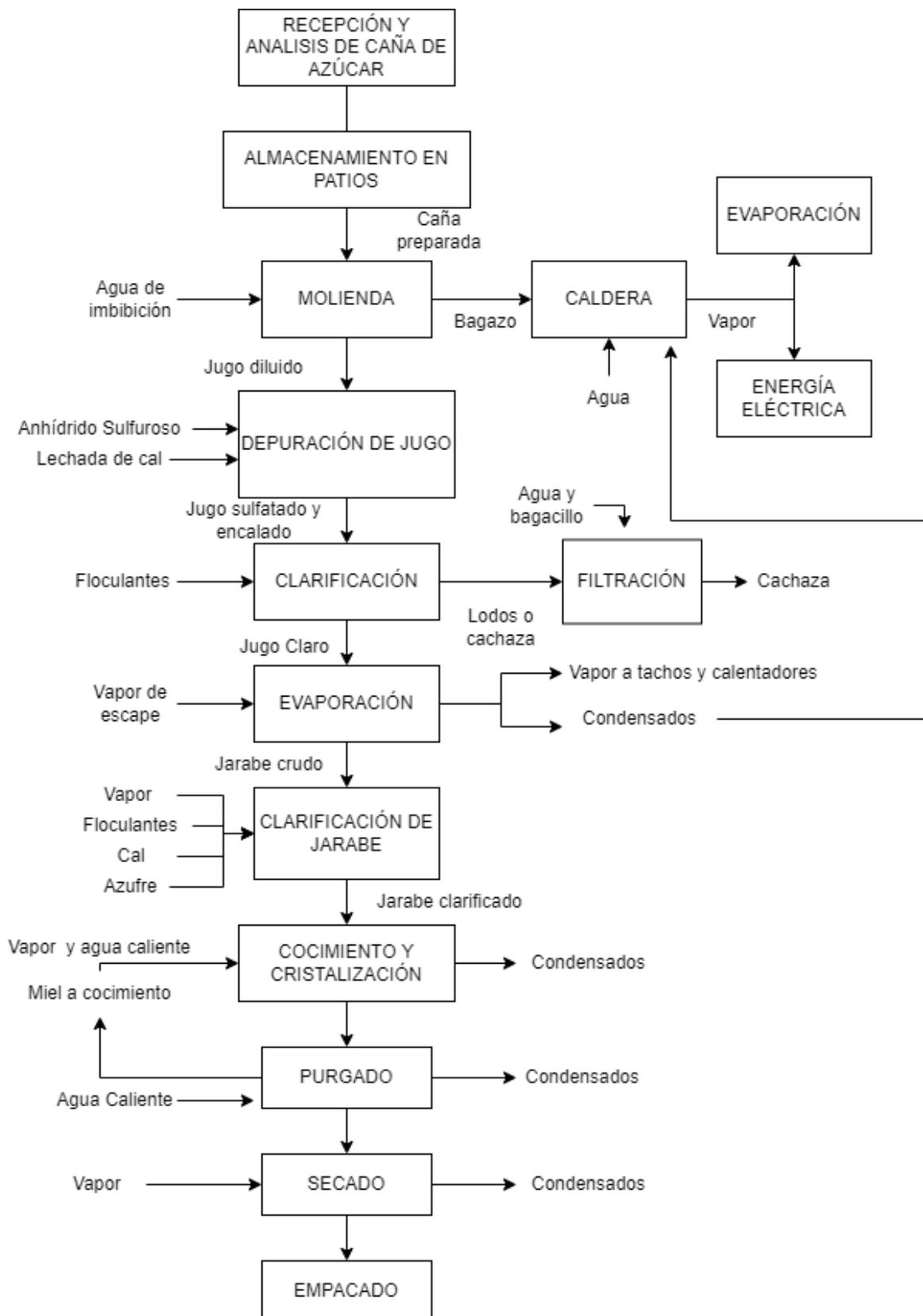
Moler, C. (2020). MATLAB (Versión R2020a). Windows. MathWorks.

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

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

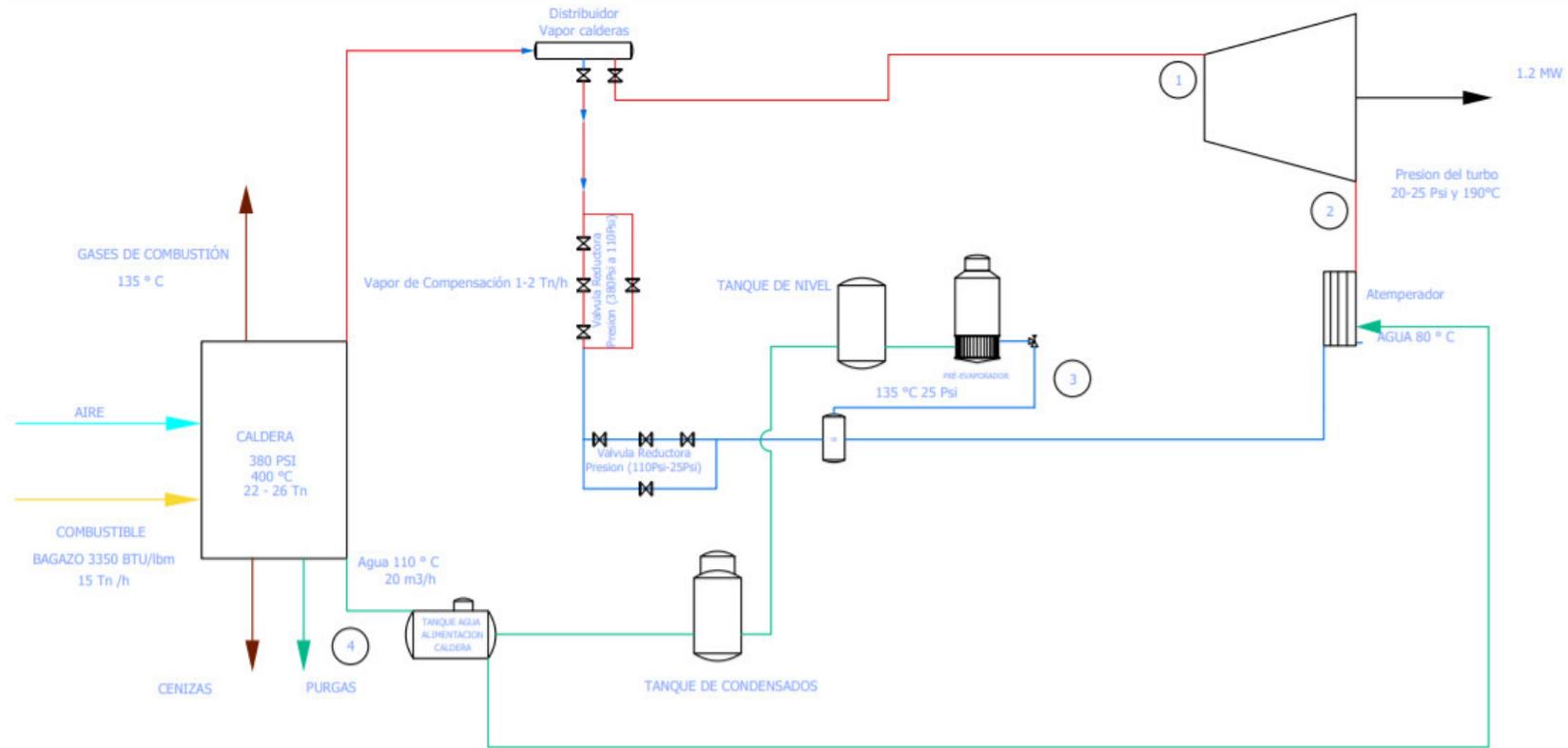
## 4 ANEXOS

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



(Fuente: Propia)

## ANEXO II. Diagrama línea base

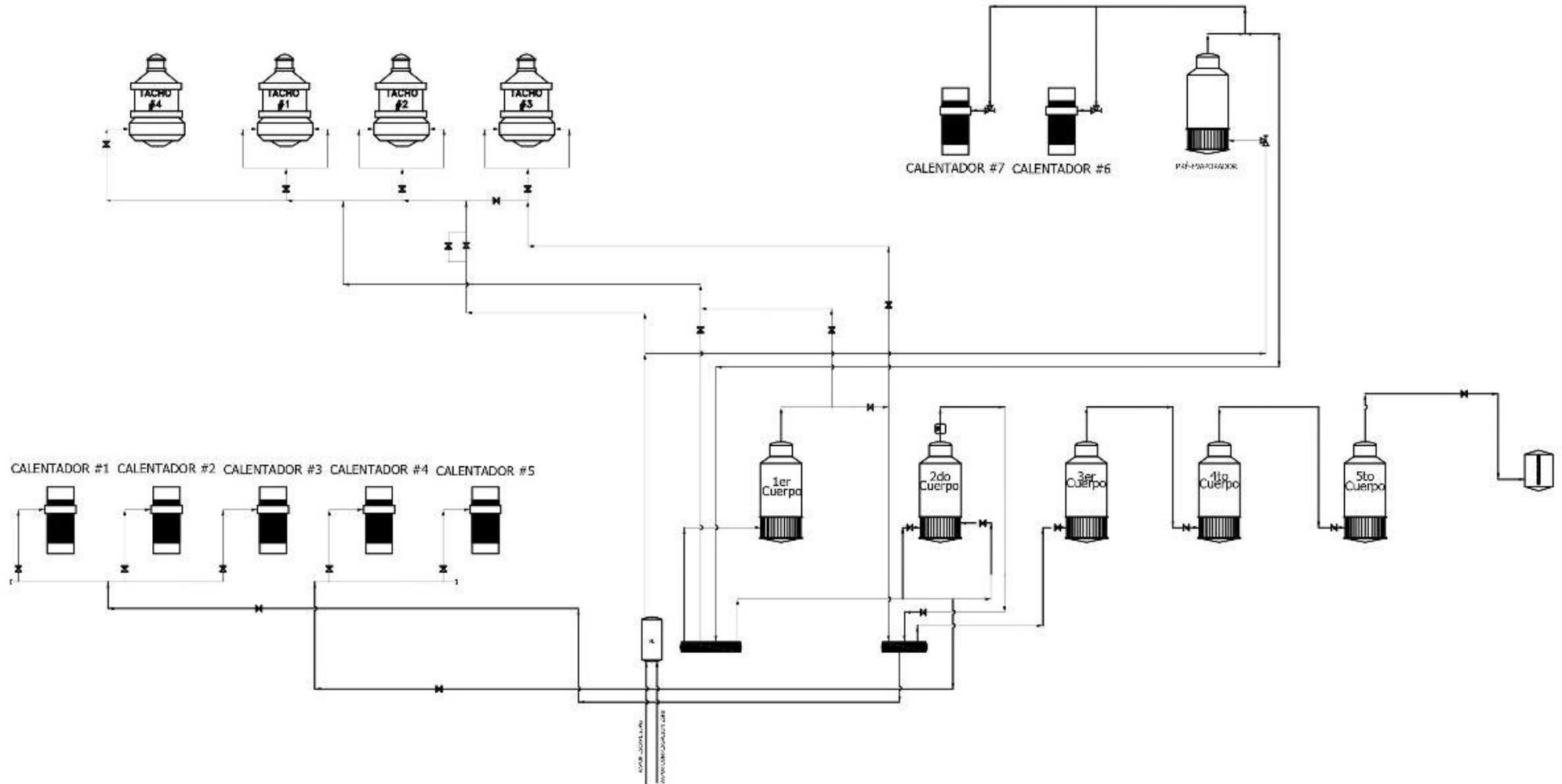


1. Salida de vapor de Caldera y entrada al turbo.
2. Salida de Turbo y entrada a Atemperador.
3. Salida de Atemperador y entrada a Preevaporador.
4. Salida de Preevaporador e ingreso a Caldera

— CONDENSADOS  
 — VAPOR SATURADO  
 — VAPOR SOBREALENTADO

(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)

## ANEXO V. Comprobación de resultados de aislante térmico en Matlab

```

syms T_s
%% Datos de entrada
D=0.40; % [m]
D_a=[0.40:0.001:1]
Pvs=115/14.504; % [BAR]
Ta=30+273.15; % [K]
Tv=390.05+273.15; % [K] valor calculado
Tw=113.89; % [oC]
hout=25; % [W/m2-K]
n=0.5774; % eficiencia de la caldera
e_1=0.8; % emisividad de la tubería sin recubrimiento
e_2=0.13; % emisividad de la tubería con aislamiento
B=5.6704e-8; % [W/m2-K^4] Constante de Stefan-Boltzmann

cost=118,67; % [USD/m] Costo del aislante icluido la mano de
obra
hora=6840; % [hora/año]
PCS=8210.78; % [kJ/kg] Poder calórico superior
fc=7.95; % [USD/ton] Costo combustible
ka=0.060; % [W/m2-K] Conductividad térmica del aislante

%% Consumo específico
hs=3217.46; % [kJ/kg] Entalpía de vapor
hw=480.57; % [kJ/kg] Entalpía de agua de alimentación

CE=(n*PCS)/(hs-hw); % [kgv/kgc] Consumo específico de energía

%% Resistencias térmicas sin aislamiento
Tsup=Tv; % sin aislamiento
hr=e_1*B*((Tsup+Ta)*(Tsup^2+Ta^2)); % [W/m2-K] Coeficiente de
transferecia de calor por radiación
Rrad=1/(hr*pi*D);
Rconv=1/(hout*pi*D);
Rt=1/((1/Rrad)+(1/Rconv)); % [oC/W]

%% Pérdida de calor por unidad de longitud de la tubería por no estar
aislada
Qp=(Tsup-Ta)/Rt; % [W] (por metro de longitud de tubo)

%% Espesor de un aislante
t_cr=(ka/hout) % para que sea óptimo la temperatura de la
superficie debería ser igual a la del ambiente
Da=D+(2*t_cr); % diámetro del aislante
Tsup2=(Tv+Ta)/2; % Temperatura de la superficie

%% Resistencias térmicas con aislamiento
Ra=log(D_a/D)/(2*pi*ka);
hr_2=e_2*B*((Tsup2+Ta)*(Tsup2^2+Ta^2)); % [W/m2-K]
Rrad_2=1/(hr_2*pi*D);
Rt2=1/((1/Rrad_2)+(1/Rconv))+Ra;
Qp2=(Tsup2-Ta)./Rt2; % [W] (por metro de longitud de tubo)

%% Energía ahorrada

```

```

Qah=Qp-Qp2;           %[W/m] Potencia ahorrada
Qap=Qah*hora*(1/1000);  %energía ahorrada por [kW-h/año]

%% Ahorro económico
Ms=Qap*3.6E6;         %[USD/m-year]

%% Inversión inicial
inv=((D_a-D)/2)*cost;

hold on
plot(D_a,Qp2);
yyaxis right
plot(D_a,inv);
grid on
hold off

```

## ANEXO VI. Determinación del índice de generación

INDICE DE GENERACION BRUTO:  $I_{gb} =$

INDICE DE GENERACION:  $I_{gn} = I_{gb} - N_g$

$$h_v - t_{aa}$$

P <sub>v</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		8.5		11				18				28			
		170		183.0		240.0		206.0		320.0		229.0		400.0	
T <sub>v</sub> °C		661		664.1		696.2		667.8		733.6		669.5		772.2	
h (kcal/kg)															
t <sub>aa</sub> °C		90	100	90	100	90	100	90	100	90	100	90	100	90	100
humedad %	VCI kcal/kg														
35	2552	4.46	4.54	4.44	4.52	4.21	4.28	4.42	4.49	3.48	4.03	4.40	4.48	3.74	3.80
47	1970	3.44	3.51	3.43	3.49	3.25	3.30	3.41	3.47	3.06	3.11	3.40	3.46	2.89	2.93
48	1922	3.36	3.42	3.35	3.41	3.17	3.22	3.33	3.38	2.99	3.03	3.32	3.37	2.82	2.86
49	1873	3.27	3.33	3.26	3.32	3.09	3.14	3.24	3.30	2.91	2.96	3.23	3.29	2.74	2.79
50	1825	3.19	3.25	3.18	3.23	3.01	3.06	3.16	3.21	3.83	3.88	3.15	3.20	2.67	2.71
51	1776	3.10	3.16	3.09	3.15	2.93	2.98	3.07	3.13	2.76	2.80	3.06	3.12	2.60	2.64
52	1728	3.02	3.07	3.01	3.06	2.85	2.90	2.99	3.04	2.68	2.73	2.98	3.03	2.53	2.57

Los valores de eficiencia de generación típicos de la tabla anterior están referidos a calderas con buen estado técnico y superficies limpias

**Tipo de generador**

**N<sub>g</sub>**

**Tipo de generador**

**N<sub>g</sub>**

1 RETO

80

5 EVELMA (con calentador de aire)

75

Para los casos

2 RETAL

78

6 Tubo recto (horno herradura

65

6, 7 y 8 con

3 Alemana 45 t/h

80

sin calentador de aire)

arco radiante

4 Alemana 25 t/h

65

7 Stirling (horno herradura

65

N<sub>g</sub> = 68

(sin remodelar y sin calentador de aire)

sin calentador de aire)

8 EVELMA (sin calentador de aire)

65

(Fuente: Rodríguez, 1997)

## ANEXO VII. Cálculo de valores óptimos de aislante térmico mediante el programa 3EPlus

Para encontrar los valores óptimos del aislamiento, el programa 3EPlus cuenta con 3 apartados de los cuales sólo serán utilizados para este proyecto los apartados “Energy” y “Economics”. En el apartado “Energy” se completan las especificaciones de la tubería necesarias para que el mismo pueda calcular el espesor del aislamiento, la temperatura de la superficie, la pérdida de calor y la eficiencia.

En “system application” se selecciona el elemento a ser recubierto y su posición, en esta ocasión se va a realizar un estudio para tuberías en disposición horizontal. En “Dimensional standard” se selecciona la norma con la que el programa trabajará para dar los tamaños adecuados de espesor. La norma seleccionada es la ASTM C585 la cual contiene las dimensiones para un aislamiento rígido preformado para tubos y tuberías (ASTM, 2004).

En “Calculation type” se selecciona el tipo de estudio que se realizará, en este caso Pérdida de calor por hora. “Process Temp” se indica la temperatura de saturación a la presión de la caldera, esto en el caso de generación de vapor saturado. Al encontrarse el sistema dentro de la instalación, no se tomará en cuenta la velocidad del viento. En “NPS Pipe Size” se indica el diámetro nominal de la tubería (ASTM, 2004) en la que se va a trabajar.

El material base de la tubería es de acero y el material que recubrirá al aislante será de aluminio.

The screenshot shows the 'ENERGY' tab of the 3EPlus software. The 'Insulation Thickness' section has the following inputs:

- Item ID: 1
- Item Description: CALDERA-TURBO
- System Application: Pipe - Horizontal
- Dimensional Standard: ASTM C 585 Rigid
- Calculation Type: Heat Loss Per Hour
- Process Temp: 734 °F
- Ambient Temp: 86 °F
- Wind Speed: 0.0 mph
- NPS Pipe Size: 8 in

The 'Insulation Layers' section includes 'Add' and 'Delete' buttons and a table:

#	Type	Name	Lock Thickness	Thickness
	Base Metal	Steel		
1	Insulation	850F Mineral Fiber PIPE, Type I, C547-15	Vary	
	Jacket Material	0.1 Aluminum, oxidized, in service		

En el resto de los apartados “Economics” Se repetirán algunos apartados los cuales se actualizarán automáticamente. A continuación, se muestran los valores que se han agregado en cada apartado referentes a la eficiencia con la que trabaja el sistema y costos tanto del combustible como del aislante.

ENERGY	ENVIRONMENT	ECONOMICS	OPTIONS	
Insulation Thickness				
Item ID:	1			
Item Description:	CALDERA-TURBO			
System Application:	Pipe - Horizontal			
Dimensional Standard:	ASTM C 585 Rigid			
Fuel Type:	Bagazao			
Heat Content:	3530	BTU/lb		
Fuel Cost:	7.95	\$/lb		
Efficiency:	75	%		
Process Temp:	734	°F		
Ambient Temp:	86	°F		
Wind Speed:	0.0	mph		
Hours Per Year:	8320	hrs/yr		
NPS Pipe Size:	8	in		
Insulation Layers				
<input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/>				
#	Type	Name	Lock Thickness	Thickness
	Base Metal	Steel		
1	Insulation	850F Mineral Fiber PIPE, Type I, C547-15	Vary	
	Jacket Material	0.1 Aluminum, oxidized, in service		

Insulation Thickness

Item ID: 1

Item Description: CALDERA-TURBO

System Application: Pipe

Dimensional Standard: ASTM C 585 Rigid

Fuel Type: Bagazao

Heat Content: 3530 BTU/lb

Fuel Cost: 7.95 \$/lb

Efficiency: 75 %

Process Temp: 734 °F

Ambient Temp: 86 °F

Wind Speed: 0.0 mph

Hours Per Year: 8320 hrs/yr

NPS Pipe Size: 8 in

Installation Complexity: Average

Material Price, \$/ft for 2 x 2 pipe insulation, including jacket: 6.01

Material Price, \$/sqft for 2 inch thick board or block, including jacket: 2.40

Labor Rate, \$/hr including overhead: 13.63

Insulation Layers

Add Delete

#	Type	Name	Lock Thickness	Thickness
	Base Metal	Steel		
1	Insulation	850F Mineral Fiber PIPE, Type I, C547-15	Vary	
	Jacket Material	0.1 Aluminum, oxidized, in service		

## ANEXO VIII. Valor de pesaje para bagazo



**ESPINOSA PAEZ S.A.**  
REPRESENTACIONES INDUSTRIALES

Dirección | Av. Madrid E12-71 e Isabel La Católica  
 Quito, Ecuador  
 Teléfono | (593) 2 250-3774 254-8898  
 E-Mail | ventas@iespinosapaez.com

### TABLA DE COMPONENTES Y PRECIOS

#### PLATAFORMA 3000KG 1X1

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO LOCAL	TOTAL
<b>METTLER TOLEDO</b>				
1	PLATAFORMA PFA220-DIS3000+IN3231 3000KG 1X1 MTS	1	\$ 1,800.00	\$ 1,800.00
	Esquineros	1	\$ 200.00	\$ 200.00
2	Entrega del Equipo	1	\$ 80.00	\$ 80.00
<b>INSTALACIÓN / AJUSTE DE CELDA / CERTIFICACION</b>				
3	Blz Sobre Piso 1001 a 2500 Kg III	1	\$ 800.00	\$ 800.00
<b>MOVILIZACION TECNICOS</b>				
4	Quito	1	\$ 40.00	\$ 40.00
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 2,920.00</b>
			<b>IVA</b>	<b>\$ 350.40</b>
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3,270.40</b>

### CONDICIONES DE PROFORMA

**Forma de Pago:**

**Local: 50% Anticipo con una orden de compra en firme. 50% contra entrega del equipo.**

**Tiempo de Entrega:**

**Local: 2 semanas bajo confirmación de stock.**

**Validez de la oferta: 15 días**

**El precio incluye:**

- Servicio de instalación, ajuste y calibración del Sistema de Pesaje.
- Garantía de 1 (un) año contra defectos de fabricación.

**El precio no incluye:**

- Obra Civil: Nivelación del piso o fosa.
- Tubería eléctrica entre el sitio de ubicación de la plataforma hacia sitio de ubicación del Indicador de Peso para el cable de la señal de la balanza. La distancia entre estos



ESPINOSA PAEZ S.A.  
REPRESENTACIONES INDUSTRIALES

Dirección: Av. Machi E12-71 e Isabel La Católica  
Quito, Ecuador  
Teléfono: (02) 250-2774 / 254-8098  
E-Mail: [ventas@espinosapaez.com](mailto:ventas@espinosapaez.com)

no podrá exceder los 5 metros.

- Soporte para sujeción del indicador de peso para acoplarle en la pared, de ser necesario (US \$ 50 + IVA)
- Instalaciones eléctricas: se requiere una línea de 110V con tierra para el indicador y tubería eléctrica para los cables de las celdas hacia la caja de unión y de esta al Indicador de Peso.
- Rampas para subir la carga en la báscula.
- La báscula incluye 5m de cable hasta el indicador. Si se requiere cable adicional se cotiza por separado.

Esperando que esta cotización este de acuerdo a sus requerimientos y gustosos de ampliar cualquier información adicional, me suscribo.

Muy Atentamente,

Espinosa @ Paez

**Ing. Raúl Illáñez A.**

Soluciones Industriales

Espinosa Páez S.A.

Rafael León Larrea N24-147 y Vizcaya. La Floresta. Quito

Tel. (02) 250 2774 / 254 8098

Cel. 098 068 5489 (Móvil)

[www.espinosapaez.com](http://www.espinosapaez.com)

[facebook](#) - [youtube](#) - [Instagram](#)

(Fuente: Espinosa Páez S.A.)