

*Universidad de Matanzas*  
*sede “Camilo Cienfuegos”*  
*Facultad de Ciencias Técnicas*



**PROPUESTAS PARA EVALUACIÓN Y OPERACIÓN DE LA  
CALDERA DE VAPOR NO. 5 DE LA EMPRESA DE PERFORACIÓN  
Y EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO DEL CENTRO-CUBA**

**Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica**

**Autor: Yenier Morales Rodríguez**

**Tutor: Dr. C. Ing. Roberto Vizcón Toledo**

*Matanzas, 2022*

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Miembros del Tribunal:

---

Presidente

---

Secretario

---

Vocal

## **AGRADECIMIENTOS**

Un especial agradecimiento a mis padres por su apoyo incondicional y la ayuda que me han dado en el transcurso de mis estudios.

A mi tutor por la ayuda y el asesoramiento brindado, sin el cual no hubiese podido llegar a este resultado.

A todos los profesores que de una forma u otra contribuyeron a mi formación como profesional.

A todos, MUCHAS GRACIAS.

## RESUMEN

En el presente Trabajo de Diploma, de manera general, se caracterizan los generadores de vapor, los distintos combustibles utilizados en dicho proceso de generación y los usos del vapor en la industria. Se crea un Software para el Control de Parámetros de la Caldera de Vapor Pirotubular No. 5 de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro-Cuba. Con el fin de la realización de dicho Software se plantean las condiciones de trabajo de dicho Generador de Vapor, sus características y datos técnicos de funcionamiento. Se plantean los requerimientos mínimos para la arrancada y parada de la caldera, así como los métodos para los cálculos de Rendimiento, Índices de Desempeño Energético, Indicadores de Prefactibilidad Termoeconómica (Intensidad Energética, Productividad Termoeconómica, Costo Termoeconómico, Eficiencia Termoeconómica), Impacto Ambiental debido a la combustión, se comparan los métodos de cálculo de rendimiento y dichos resultados con la Eficiencia Nominal de la Caldera.

**Palabras claves:** caldera; generador de vapor; energía; desempeño energético; impacto ambiental.

## **ABSTRACT**

In this Diploma Work, at general form, steam generators are characterized, the different fuels used in said generation process and the uses of steam in industry. A Software is created to Control the Parameters of the Firetube Steam Boiler No. 5 of the Petroleum Drilling and Extraction Company of Centro-Cuba. In order to carry out said Software, the working conditions of said Steam Generator, its characteristics and technical data of operation are proposed. The minimum requirements for the startup and shutdown of the boiler are proposed, as well as the methods for calculating Performance, Energy Performance Indices, Thermoeconomic Prefeasibility Indicators (Energy Intensity, Thermoeconomic Productivity, Thermoeconomic Cost, Thermoeconomic Efficiency), Environmental Impact due to combustion, performance calculation methods and these results are compared with the Nominal Efficiency of the Boiler.

**Keywords:** boiler; steam generator; vapor; energy; energy performance; environmental impact.

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1</b> .....	4
<b>1.1 Clasificación de las calderas de vapor.</b> .....	4
<b>1.1.1 Clasificación de las calderas piro-tubulares.</b> .....	8
<b>1.2 Partes de una caldera piro-tubular.</b> .....	9
<b>1.3 Mecanismos de transferencia de calor en las calderas.</b> .....	10
<b>1.4 Usos en la industria.</b> .....	10
<b>1.5 Norma ISO 50001.</b> .....	11
<b>1.5.1 Indicadores de desempeño energético Norma ISO 50001.</b> .....	11
<b>1.5.2 Los índices de desempeño energético para los generadores de vapor.</b> .....	12
<b>1.6 Leyes de la Termodinámica.</b> .....	13
<b>1.6.1 Primera Ley de la Termodinámica.</b> .....	14
<b>1.6.2 Métodos de cálculo del rendimiento de generadores de vapor.</b> .....	14
<b>1.7 Criterios termoeconómicos y de sostenibilidad ecosistémica.</b> .....	17
<b>1.7.1 Costo termoeconómico.</b> .....	19
<b>1.8 Combustibles fósiles.</b> .....	20
<b>1.8.1 El gas natural.</b> .....	20
<b>1.8.2 Gas Natural Licuado (GNL).</b> .....	22

<b>1.8.3 Principales propiedades del Fueloil.....</b>	<b>22</b>
<b>1.9 Eficiencia energética.....</b>	<b>25</b>
<b>1.9.1 Eficiencia energética en sistemas de uso de energía no renovable. ....</b>	<b>25</b>
<b>1.10 Impacto ambiental debido a la combustión.....</b>	<b>25</b>
<b>1.11 Conclusiones parciales del Capítulo.....</b>	<b>28</b>
<b>Capítulo 2 Métodos y materiales. ....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Descripción general del proceso.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Descripción de cada una de las etapas y equipos del proceso. ....</b>	<b>31</b>
<b>2.3 Secuencia de operaciones de arranque y parada de la caldera.....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.1 Arranque desde condiciones de temperatura ambiente. ....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.2 Parada de la Instalación.....</b>	<b>44</b>
<b>2.4 Modelo de libro de registro de parámetros de operación e incidencias del funcionamiento.....</b>	<b>45</b>
<b>2.5 Limpieza de la Caldera.....</b>	<b>46</b>
<b>2.6 Datos para el cálculo de los parámetros del Generador de Vapor.....</b>	<b>47</b>
<b>2.3 Metodologías de cálculo de la eficiencia de operación de la caldera. 49</b>	
<b>2.3.1 Método directo de cálculo de la Eficiencia bruta de operación del Generador de Vapor.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.2 Método indirecto de cálculo de la Eficiencia bruta de operación del Generador de Vapor.....</b>	<b>50</b>
<b>1.3.3 Cálculo del rendimiento exergético. ....</b>	<b>52</b>



<b>2.4 Índices de Desempeño Energético para el Generador de Vapor.</b>	<b>53</b>
<b>2.5 Indicadores de prefactibilidad termoeconómica.</b>	<b>54</b>
<b>2.5.1 Consumo total de combustible equivalente (Beq):</b>	<b>54</b>
<b>2.5.2 Intensidad Energética.</b>	<b>54</b>
<b>2.5.3 Productividad Termoeconómica:</b>	<b>55</b>
<b>2.5.4 Eficiencia Termoeconómica.</b>	<b>55</b>
<b>2.5.5 Costo Termoeconómico.</b>	<b>55</b>
<b>2.6 Impacto Ambiental.</b>	<b>56</b>
<b>2.7 Conclusiones parciales del Capítulo.</b>	<b>56</b>
Capítulo 3 Análisis de los resultados.	58
<b>3.1 Utilización del software.</b>	<b>58</b>
<b>3.2 Cálculo de rendimiento.</b>	<b>59</b>
<b>3.2.1 Cálculo de rendimiento por método directo.</b>	<b>60</b>
<b>3.2.2 Calculo de rendimiento por método indirecto.</b>	<b>60</b>
<b>3.2.3 Análisis de rendimiento.</b>	<b>61</b>
<b>3.2.4 Rendimiento exergetico.</b>	<b>61</b>
<b>3.3 Índice de Desempeño Energético.</b>	<b>62</b>
<b>3.4 Indicadores de Prefactibilidad Termoeconómica y Daño Ambiental..</b>	<b>63</b>
<b>3.5 Recomendaciones para el buen funcionamiento de la Caldera.</b>	<b>63</b>
<b>3.6 Conclusiones Parciales del Capítulo.</b>	<b>64</b>

Conclusiones .....	65
Recomendaciones .....	66
Referencias Bibliográficas .....	67
<b>Anexos</b> .....	<b>69</b>

## **Introducción**

Gracias a sus múltiples aplicaciones, el vapor de agua es uno de los servicios auxiliares más requeridos en la industria cubana, por lo que los equipos que se usan para su generación, denominados calderas, ocupan un lugar muy importante en el ámbito industrial, en las que destacan principalmente las calderas de combustión piro-tubulares. En Cuba funcionan más de 4000 calderas piro-tubulares también llamadas de tubos de fuego en las cuales se consumen importantes cantidades de petróleo crudo nacional y gas natural.

Las múltiples aplicaciones que tienen las calderas industriales, las condiciones variadas de trabajo y las innumerables exigencias de orden técnico y práctico que deben cumplir para que ofrezcan el máximo de garantías en cuanto a solidez, seguridad en su manejo, durabilidad y economía en su funcionamiento, ha obligado a los fabricantes de estos equipos a un perfeccionamiento constante a fin de encarar los problemas. La búsqueda de soluciones ha originado varios tipos existentes agrupados según sus características más importantes.

En la industria una caldera o generador de vapor es un recipiente metálico, cerrado, dotado de una fuente de calor donde se calienta o se hace hervir el agua. En términos generales, una caldera es un intercambiador de calor que aprovecha el calor que se produce al quemar un combustible, ya sea sólido, líquido e incluso gaseoso, donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor de un fluido (principalmente agua), esto se logra mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica. Las calderas varían extensamente en su diseño dependiendo del método de combustión usado, el combustible utilizado, el campo de uso, tipo de circulación de agua empleada, y la presión del vapor.

De acuerdo con (Cusme, 2014)

“El termino de generador de vapor está siendo utilizado en la actualidad para reemplazar la denominación de caldera, e indica al conjunto de equipos compuestos por: horno (u hogar), cámaras de agua (o evaporador), quemadores, sobre calentadores, recalentadores, economizador y pre calentador de aire ”.

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, tiene bajo su responsabilidad la extracción del petróleo y gas de los yacimientos ubicados en la región central del país. Dado que el estado natural del crudo en los yacimientos se encuentra en forma de tres fases (Petróleo – Gas – Agua), se necesita someter el crudo a varias etapas de separación y tratamiento hasta obtener el producto con la calidad requerida. Los Generadores de Vapor se utilizan con la finalidad de obtener vapor para todo el proceso de tratamiento del crudo, permitiendo la disminución de viscosidad del mismo, con la separación de las fases y la posterior deshidratación, por lo que resultan vitales para todo el proceso de intercambio de calor en el tratamiento y posterior venta en calidad por Oleoducto Magistral.

Desde el primer mantenimiento general (el que se hace todos los años a las calderas), posterior al re entubado, ejecutado por Fabrica de Calderas Sagua la Grande, comienzan a ocurrir fallos por salideros en el primer pase de la parte derecha y esto con el paso del tiempo se ha agudizado, al punto de no poder controlar los salideros y tener que soldar de forma repetida en los mismos lugares, por lo que se realiza la reparación capital de la caldera la cual incluye: extracción de toda la flusería de la cámara de fuego interior y de la placa trasera, sustitución de la placa delantera de la cámara de fuego interior, ensamble y soldadura de la cámara de fuego interior, de la placa trasera y de toda la flusería de la caldera, cierre del cuerpo a presión de la caldera y prueba hidráulica del sistema.

Luego de la reparación que se realiza al Generador de Vapor resulta de gran interés para la Empresa el cálculo de los distintos parámetros de la caldera para la evaluación de su funcionamiento.

**Problema:** La caldera objeto de estudio está siendo reparada y remodelada y no existe un software para ser evaluada y poder adecuar su manual de funcionamiento, ya que no existen

registros de control de funcionamiento, la instrumentación necesaria ni recomendaciones de operación y mantenimiento.

**Hipótesis:** A partir de la realización de un software será posible calcular la eficiencia de operación, los índices de desempeño energético, indicadores de prefactibilidad termoeconómica e impacto ambiental de la caldera después de ser reparada y compararlos con los resultados obtenidos antes de dicha reparación los que se tendrán en consideración para la operación eficiente, segura y prolongada de la instalación.

**Objetivo general:** Crear un software para realizar el cálculo de eficiencia, definiendo los índices de desempeño energético de la caldera para adecuar el manual de funcionamiento a la remodelación realizada.

**Objetivos específicos:**

- Realizar un estudio de la documentación técnica existente del generador de vapor objeto de estudio.
- Crear un software para evaluar el funcionamiento del Generador de Vapor.
- Calcular la eficiencia, índices de desempeño energético, indicadores de prefactibilidad termoeconómica e impacto ambiental de la caldera para comprobar el funcionamiento del software.

**Tareas a cometer:**

- Definir los índices de desempeño energético para generadores de vapor, en específico uno que genera vapor para procesar petróleo crudo.
- Establecer métodos de cálculo de rendimiento energético y exergético.
- Plantear método de cálculo de prefactibilidad termoeconómica e impacto ambiental de la caldera.
- Realizar un software para la evaluación de la caldera al terminar su reparación utilizando los métodos de cálculo planteados.
- Utilizar datos obtenidos de la caldera para comprobar el funcionamiento del software.

## Capítulo 1

En la realización de la tarea investigativa relativa a determinar los índices de desempeño energético de la caldera de vapor # 5 de la Planta de Procesamiento de Crudos perteneciente a la Empresa EPEP Centro fue necesario revisar el estado del arte en lo concerniente a las temáticas: características de los generadores de vapor, especialmente de las calderas piro-tubulares, mecanismos de transferencia de calor en las calderas, usos en la industria, indicadores de desempeño energético, sus métodos de cálculo de eficiencia, una breve caracterización del combustible utilizado por la caldera combustible utilizado y el impacto ambiental debido a la combustión.

### 1.1 Clasificación de las calderas de vapor.

**Clasificación en función a la posición relativa entre el fluido a calentar y los gases de combustión:**

**Con tubos múltiples de humo – Piro-tubulares** (Bahamondes, 2006)

Son generadores de vapor pequeños, también conocidas como calderas de tubos de fuego. En este tipo de calderas los gases calientes circulan por dentro de los tubos y el agua circula por el exterior de estos, en ellas se genera agua caliente o vapor saturado. Existen diferentes tipos de calderas piro-tubulares de acuerdo con el número de pasos de los gases en sentido longitudinal.

Las calderas piro-tubulares se componen por un hogar o tubo central, tubos de humo o fluses, placas, casco o carcasa, una cámara de agua y una cámara de vapor.



*Figura 1.1: Caldera Pirotubular. (Fuente: CMI)*

**Ventajas:**

- Menor costo inicial, debido a la simplicidad de diseño en comparación con las acuotubulares de igual capacidad.
- Mayor flexibilidad de operación, ya que el gran volumen de agua permite absorber fácilmente las fluctuaciones en la demanda de vapor.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación, porque las incrustaciones formadas en el exterior de los tubos son más fáciles de atacar y son eliminadas por las purgas.
- Facilidad de inspección, reparación y limpieza.

**Desventajas:**

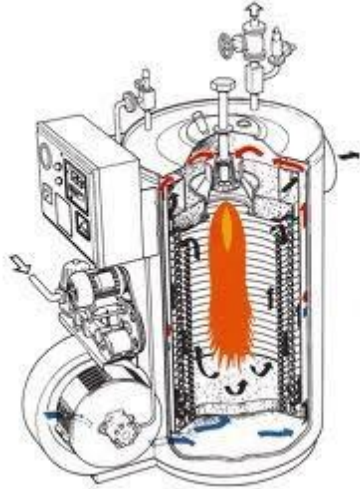
- Mayor tamaño y peso que las acuotubulares de igual capacidad.
- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- Gran peligro en caso de explosión o ruptura, debido al gran volumen de agua almacenado.
- No son empleadas para altas presiones.

**Con tubos múltiples de tubos de agua – Acuotubulares (Bahamondes, 2006)**

Son generadores de vapor de pequeño volumen de agua. En este tipo de calderas el agua circula por dentro de los tubos, mientras que los gases circulan por el exterior de estos, de manera contraria a cómo trabajan las calderas pirotubulares.

Una caldera acuotubular consta básicamente de tambores y de tubos. Los tubos a través de los cuales circula el agua y en los que circula el vapor generado están fuera de los tambores, estos son utilizados solo para almacenar agua y vapor, por lo que pueden ser mucho más

pequeños en diámetro que el tambor de una caldera piro-tubular y pueden soportar mayores presiones. Las calderas acuotubulares son las empleadas casi exclusivamente cuando interesa obtener elevadas presiones y altos índices de rendimiento o eficiencia.



*Figura 1.2: Caldera Acuotubular (Fuente: Absorbsistem)*

Ventajas:

- Menor peso por unidad de potencia generada.
- Por tener pequeño volumen de agua en relación a su capacidad de evaporación, puede ser puesta en marcha rápidamente.
- Mayor seguridad para altas presiones.
- Mayor eficiencia.
- Son inexplorivas.

Desventajas:

- Su costo es mayor.
- Deben ser alimentadas con agua de gran pureza, ya que las incrustaciones en el interior de los tubos son, a veces, inaccesibles y pueden provocar roturas de los mismos.
- Debido al pequeño volumen de agua, le es más difícil ajustarse a las grandes variaciones del consumo de vapor, siendo necesario trabajarlas a mayor presión que la necesaria en las industrias.

A continuación, se muestra una tabla comparativa realizada por el Dr. Eberhard Franz en el año 2013 donde se muestran las diferencias entre una caldera de tipo piro-tubular y una caldera acuo-tubular:



Criterios	Calderas Piro-tubulares	Calderas Acuo-tubulares
Calidad del agua	Menores exigencias, posible funcionamiento con salinidad del agua	Mayores exigencias, es necesario un bajo nivel de salinidad para su funcionamiento
Mantenimiento	fácil de limpiar	Más costoso
Revisiones periódicas	Inspección ordinaria, seguida de una prueba hidrostática, raramente son necesarias otras pruebas de carácter no destructivo, como por ej. as mediciones con ultrasonidos, en caso contrario se efectúan en zonas muy reducidas	Son necesarias mediciones con ultrasonidos además de prueba hidrostática; es decir, pruebas costosas en tiempo y dinero
Costes para niveles comparables de gasto de fabricación y calidad	Menores	Mayores
Rendimiento	Mayor, de fácil mantenimiento	Menor; es más difícil realizar su mantenimiento en funcionamiento
Características de la carga parcial	Puede aprovecharse el control del quemador; cuando caiga por debajo de la carga mínima, el quemador puede apagarse sin problemas	En el caso de determinados diseños, debe limitarse la carga parcial; el quemador no puede apagarse manualmente
Contenido de agua	Mayor, debido a su diseño	Menor
Capacidad de acumulación	Debido al alto volumen de agua, no es susceptible a las fluctuaciones de presión y carga	Susceptible a las fluctuaciones de presión y carga resultantes del proceso
Plazo de entrega	Más corto	Más largo
Necesidades de espacio	Reducidas	Elevadas
Tiempo necesario para el montaje y puesta en marcha inicial	Reducido	Más prolongado

*Figura 1.3: Tabla comparativa entre una caldera piro-tubular y una caldera acuo-tubular. Fuente: Dr. Eberhard Franz.*

#### **Con relación a la configuración.**

- Vertical
- Horizontal

#### **Con relación del mecanismo de transmisión de calor dominante.**

- Convección
- Radiación
- Radiación y Convección

#### **Con relación del combustible empleado.**

- Combustibles sólidos (carbón mineral, carbón vegetal, lignito, etc.)
- Combustibles líquidos (diésel, petróleo residual)

- Combustibles gaseosos (GLP, GN)
- Combustibles especiales (licor negro, bagazo, etc.)
- De recuperación de calor de gases
- Mixtas
- Nucleares

#### **En base al tiro de los gases:**

- Tiro natural: no requieren sistemas de ventilación adicional para evacuar los gases de la combustión
- Tiro inducido o forzado: disponen de un ventilador integrado que garantiza una correcta evacuación de los gases quemados.

#### **En función de las necesidades energéticas del proceso:**

- Calderas de agua caliente.
- Calderas de agua sobrecalentada.
- Caldera de vapor saturada.
- Calderas de vapor sobrecalentado.
- Caldera de fluido térmico.

#### **1.1.1 Clasificación de las calderas piro-tubulares.**

Debido a que este es el tipo de calderas de uso más extendido en la industria, con el tiempo se han desarrollado modelos para atender a diferentes necesidades. Por este motivo, y que es el tipo de caldera a estudiar, es preciso clasificar los diferentes diseños para su estudio.

Una primera clasificación y tal vez la más importante según (Osejo Martínez, 2017), va de acuerdo al tipo de combustible y los diferentes mecanismos usados en su combustión. En este aspecto hay tantos tipos de calderas como combustibles disponibles, pero la clasificación más amplia se da de acuerdo al estado del combustible, siendo sólidos líquidos y gaseosos.

- Las calderas para combustibles sólidos, son las de menor eficiencia entre las calderas piro-tubulares, ya que necesitan de una gran cantidad de aire para generar una mezcla apropiada de oxígeno y combustible. Además, requieren de equipos especiales para extracción de ceniza y el pre tratamiento del combustible, lo que las hace un tanto más complejas de operar, mantener, y reparar. Por otra parte, el precio de los combustibles es relativamente bajo y en algunos casos el combustible utilizado es material de desecho como cascarilla de arroz o bagazo de caña entre otros, lo que hace que el costo del combustible sea prácticamente nulo, por lo que aún se utilizan de manera amplia en la industria.

- Calderas de combustible líquido. En este tipo de calderas el combustible es bombeado desde el depósito hasta el hogar, en donde es atomizado y mezclado con aire para su posterior combustión. Este proceso es llevado a cabo por equipos llamados quemadores, que son los encargados de proveer a la caldera con el combustible y el aire necesarios para mantener la reacción.
- Calderas de combustible gaseoso. Al igual que las calderas de combustible líquido, el quemador es el encargado de suministrar el combustible y el aire para alimentar la reacción, pero en este caso el combustible no necesita ser bombeado al interior de la caldera, sino que se mueve gracias a la diferencia de presiones que hay entre el tanque de almacenamiento y el hogar. Siendo el quemador el encargado de regular el paso de combustible mediante válvulas de regulación. Cabe mencionar que las calderas de combustibles líquidos, pueden modificarse para quemar combustibles gaseosos y viceversa, solo cambiando el quemador. Este tipo de calderas es el de más eficiencia, con generación mínima de hollín y material particulado. Pero hay que tener cuidados especiales en el almacenamiento del combustible para evitar accidentes.

## **1.2 Partes de una caldera piro-tubular.**

Para cumplir con los propósitos antes mencionados y funcionar correctamente, según Osejo (2017) todas las calderas piro-tubulares cuentan con los siguientes dispositivos.

- Bomba de agua; es la encargada de suministrar y reponer el agua evaporada.
- Cámara de combustión, es el espacio físico donde se genera y mantiene la reacción de combustión.
- Control de nivel; toda caldera cuenta con un control de nivel de agua automático, que gobierna a la bomba para mantener el nivel de líquido en los niveles adecuados. Estos controles pueden ser de tipo proporcional o de tipo On-Off.
- Mirilla de nivel; este dispositivo muestra al operario de la caldera en todo momento el nivel de agua al interior del equipo.
- Presostato: Es el elemento que gobierna al quemador para mantener la presión dentro de los niveles adecuados de operación. Al igual que el control de nivel, este puede ser de tipo proporcional o de tipo On-Off.
- Manómetro; muestra al operario de la caldera la presión al interior del equipo en todo momento.
- Válvula de seguridad; toda caldera debe contar con al menos una válvula de seguridad que descargue de manera rápida pero segura el vapor contenido en la cámara de vapor, para aliviar la presión dentro del tanque, en caso de que este alcance niveles peligrosos inaceptables.
- Quemador: Encargado de iniciar o finalizar la reacción de combustión de manera segura y controlada, permitiendo o cortando el paso de los reactivos a la cámara de combustión y proporcionando las condiciones que desencadenen la reacción.
- Cámara de combustión: es el espacio físico en donde se mantiene la reacción de combustión.

- Chimenea: es el ducto de salida por el cual se descargan los gases de combustión a la atmósfera luego de haber transferido su contenido energético al agua.
- Sistema de transferencia de calor: es la red de tubos que sirven como frontera y como medio de transferencia de calor entre los dos fluidos.

### **1.3 Mecanismos de transferencia de calor en las calderas.**

De acuerdo con (Cengel Y. A., 2014) el calor es “una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura”, este a su vez tiene tres mecanismos de transferencia que son la conducción, la convección y la radiación.

- **Conducción:** Es la transferencia de energía desde un punto de un material hacia otro del mismo o un material contiguo donde las partículas más energéticas de una sustancia hacia las menos energéticas. En una caldera la conducción ocurre en el interior de la caldera debido a la resistencia que se produce entre las paredes de la caldera y el haz de tubos.
- **Convección:** Es la transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido gaseoso o líquido, es causada por el movimiento o agitación del fluido, que fuerza a las partículas calientes a remplazar continuamente a las enfriadas al contacto con la superficie fría (absorbe el calor). La convección puede ser de dos tipos, natural la cual es causada debido a las diferencias de densidad, que provienen del diferencial de temperatura, o forzada que es causada por medio de fuerzas mecánicas que obligan el movimiento del fluido. En una caldera la convección se lleva a cabo en la zona de convección, compuesta por deflectores, así como por los gases de combustión hacia el agua alrededor del haz de tubos.
- **Radiación:** Es la transferencia directa de calor en forma de energía radiante, este tipo de energía es emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones, procedente de la incandescencia del combustible o de las flamas luminosas y de los refractarios, a los tubos o al cuerpo de la caldera. En una caldera la radiación se lleva a cabo dentro del hogar (cámara de combustión) el cual se comporta como un cuerpo negro debido al hollín que se va acumulando en sus paredes.

### **1.4 Usos en la industria.**

A nivel industrial las calderas de vapor son utilizadas en la generación de vapor o agua caliente para plantas de fuerza o procesos industriales, teniendo aplicaciones en industrias como:

- **La industria alimenticia:** ya que la parte esencial de sus procesos está basada en el calor para lograr la cocción o purificación de muchos de sus productos.

- La industria hospitalaria: su principal función es en la esterilización de instrumentos. Entre más grande y más áreas de trabajo tenga el hospital es mayor la demanda de estos equipos.
- La industria de bebidas alcohólicas: es también un gran consumidor de equipos caloríficos de grandes dimensiones y potencia, aquí es muy común su uso en la aceleración de la fermentación y en el proceso de cocinado de la materia orgánica que sea la base del producto.
- En distintas industrias suelen utilizarse para la generación de electricidad a través del ciclo de Rankine.

### **1.5 Norma ISO 50001.**

El ahorro de recursos y el más eficiente uso de los sistemas de gestión energéticos cobran hoy día más relevancia que nunca por lo que resulta de gran importancia la implementación de normas que ayuden a gestionar este proceso, tal es el caso de la ISO: 50001: —Sistema de Gestión de la Energía (Normalización, O. N., 2011) . Cuba adoptó y comenzó a aplicar la norma en el año 2011 en entidades donde resulta de vital importancia el ahorro para el alcance socioeconómico del país (Lapido Rodríguez, 2015).

El departamento de mecánica de la facultad de ciencias técnicas participa desde el año 2017 el proyecto de prioridad nacional “Aplicación de la Norma ISO 50001” en la UM y en instituciones matanceras.

Ya en el año 2007 el estudio de eficiencia energética (García Morales, 2007) en la UM reportó evaluaciones energéticas de interés para el ahorro de energía y aumentos de la eficiencia energética con el uso de los portadores energéticos que utiliza la UM, estos fueron energía eléctrica, gasolina, diésel, fuel oíl y gas licuado.

#### **1.5.1 Indicadores de desempeño energético Norma ISO 50001.**

Los indicadores de desempeño energético (IDE) son valores cuantitativos o medidas del desempeño energético tal como lo defina la organización. Los IDE pueden expresarse como una simple medición, un cociente o un modelo más complejo. Cada organización deberá, por lo tanto, definir los IDE que le sirvan mejor para el desarrollo de su desempeño energético (Félix, 2019).

Un indicador de desempeño energético (IDE) es un valor cuantitativo, medible que refleja la eficiencia, el uso y el consumo de la energía del elemento donde se define, permite evaluar su cambio respecto a la línea de base y puede medirse y seguirse en el tiempo. Los IDE son aquellos que se establecen con el fin de realizar un seguimiento, monitoreo y control del desempeño energético de determinado proceso, área o equipo (Gonzales Sánchez, 2019).

Los indicadores de desempeño energético son parámetros medibles, relaciones o modelos que permiten evaluar el comportamiento energético, así como la mejora de este, mediante la comparación de sus valores actuales contra los valores iniciales de la línea base energética.

### **1.5.2 Los índices de desempeño energético para los generadores de vapor.**

Los generadores de vapor (Rubio, 2007) se caracterizan por transformar la energía química almacenada por combustibles orgánicos en energía térmica que a su vez pasa al agua que se convierte en vapor con los parámetros de calidad deseados. Es por tanto importante poder identificar las relaciones entre la producción de vapor y el consumo de combustible que viene dada por su eficiencia de operación.

*Tabla 1.1 Relación entre usos de los generadores de vapor y sus respectivos índices de desempeño energético.*

<i>Usos de los Generadores de Vapor</i>	<i>Índices de desempeño energético</i>
<i>Central Termoeléctrica</i>	<i>Cantidad de energía eléctrica producida (MW) por tonelada de petróleo consumida.</i>

<i>Central Azucarero</i>	<i>Cantidad de energía eléctrica producida por el turbo generador (kW) y guarapo calentado por kg de bagazo utilizado.</i>
<i>Cocina-comedor</i>	<i>Cantidad de raciones o masa de alimentos preparados por litro de petróleo gastado.</i>
<i>Planta de procesamiento de crudo</i>	<i>Metros cúbicos de gas o kg de petróleo consumido por toneladas de crudo producido.</i>  <i>Toneladas de vapor para calentamiento por toneladas de crudo producida.</i>

En el caso de una caldera de vapor cuya finalidad es entregar vapor para unos intercambiadores de calor, con el objetivo de calentar petróleo crudo a unos 80 °C, se obtuvieron índices de operación que relacionan el consumo de gas natural con la cantidad de barriles de petróleo calentado:

- Cantidad de toneladas de crudo calentados.
- Estado técnico y eficiencia de operación de la caldera.
- Experiencia y disciplina tecnológica del operador de la caldera.

## **1.6 Leyes de la Termodinámica.**

La Termodinámica como ciencia particular quedó establecida a partir de enunciadas sus leyes, mediante las cuales se establece que en todo sistema termodinámico cuando ocurren transformaciones de la energía durante un proceso termodinámico irreversible con cambio de equilibrio termodinámico, siempre se conserva la energía (1ra. Ley), se incrementa la entropía y se destruye la exergía (2da. Ley). Se plantea también que se produce continuamente la degradación de la energía, pero sin llegar a la llamada “muerte térmica del universo” dado su carácter de ser infinito (Cengel Y. A., 2014).

Por tanto, las Leyes de la Termodinámica permiten predecir la ocurrencia de dichas transformaciones y cuantificar-cualificar las mismas para proponer mejoras conducentes a aumentar los rendimientos termodinámicos en los procesos que ocurren.

### **1.6.1 Primera Ley de la Termodinámica.**

La primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de conservación de la energía, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de transformación de energía y ofrece las herramientas termodinámicas para caracterizar los índices de desempeño energético de un generador de vapor.

La primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso. Implícita en el enunciado de la primera ley se encuentra la conservación de la energía y aunque la esencia de la primera ley es la existencia de la propiedad energía total, con frecuencia se considera a la primera ley como un enunciado del principio de la conservación de la energía (Cengel Y. A., 2014).

### **1.6.2 Métodos de cálculo del rendimiento de generadores de vapor.**

El diagnóstico termodinámico del generador de vapor se realiza a partir de una prueba termo técnica (Rubio Gonzales, 2015), del procesamiento de los datos de la instalación y los parámetros de explotación según la carga de trabajo, entonces se aplica el método más conveniente, ya sea el directo o el indirecto, este último requiere siempre del uso de un analizador de gases producto de la combustión y los errores de sus mediciones de eficiencia conllevan a una menor imprecisión de la determinación de la eficiencia termodinámica de la caldera.

El rendimiento de los generadores de vapor depende, en gran medida, de la efectiva utilización del combustible, lo cual a su vez está determinado fundamentalmente por dos factores:

- Una combustión completa del combustible.
- El grado de enfriamiento de los gases producto de la combustión.



El calor entregado por los productos de la combustión llega hasta la sustancia de trabajo a través de las superficies de transferencia del generador de vapor. Este calor aprovechado es lo que se ha denominado calor útil, debido a que no todo el calor liberado en el proceso de combustión se utiliza para producir el vapor pues una parte de él se pierde por diferentes causas. La igualdad entre el calor suministrado al generador de vapor llamado calor disponible y la suma del calor útil y las pérdidas de calor, se determinan por medio del balance térmico (Rubio Gonzales, 2015).

Este análisis cuantitativo de las cantidades de energía que se transforman en el generador de vapor, permite determinar el rendimiento térmico y el consumo necesario de combustible.

El rendimiento térmico de los generadores de vapor depende de muchos factores entre los que se encuentran:

- El tipo de combustible y sus propiedades.
- La eficiencia del sistema de combustión.
- Las características de las superficies de intercambio térmico.
- El tipo de transferencia de calor que tiene lugar en los mismos.
- La velocidad de las sustancias que intercambian calor.
- La diferencia de temperaturas entre los fluidos que intercambian calor.
- La calidad del aislamiento térmico.
- Las sedimentaciones que pueden producirse en la superficie de intercambio térmico, que se comportan como una resistencia (Tanquero Díaz, 2002).

Durante el cálculo térmico del generador de vapor, el objetivo del balance de calor es determinar la eficiencia, el calor útil y el gasto de combustible. Este último es imprescindible para calcular los volúmenes totales de gases y poder efectuar el cálculo térmico de cada uno de los equipos. Ahora bien, el objetivo central del balance de calor, en la prueba termotécnica, es determinar la eficiencia del generador de vapor y su gasto de combustible, con el fin de, al compararlos con los datos de chapa y con las recomendaciones, poder conocer como está funcionando para, de presentar dificultades poder subsanarlas (Rubio Gonzales, 2015).

Existen dos métodos para efectuar el balance de calor, lo que proporciona dos formas para determinar la eficiencia y el gasto de combustible:

a) Balance indirecto.

El balance indirecto consiste en determinar el valor de cada una de las pérdidas y con estas la eficiencia del generador de vapor

La aplicación de este método de balance es un poco más compleja que la del que se verá a continuación, pero tiene la ventaja que permite analizar por separado la magnitud de las pérdidas, lo que facilita la localización de los puntos de ineficiencia en un generador de vapor en operación, mediante la prueba termotécnica. En el caso del cálculo térmico este método es el único factible.

El cálculo del calor útil que va a la sustancia de trabajo se debe hacer mediante la ecuación del balance térmico.

b) Balance directo.

El balance directo consiste en medir el gasto de combustible (energía consumida) y la generación de vapor y sus parámetros (energía útil) directamente en el generador de vapor durante la prueba termotécnica y determinar la eficiencia.

Se está obligado en este punto del estudio a hacer un análisis en relación a cuál de los dos métodos de balance debe ser empleado para la determinación de la eficiencia de un generador de vapor durante su prueba termotécnica. Sobre este particular se puede plantear lo siguiente:

En ambos métodos resulta necesaria la medición de ciertos parámetros en el generador de vapor:

Balance indirecto, fundamentalmente: CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub>, y análisis de cenizas.

Balance directo, fundamentalmente: Dsc, psc, tsc y B.

- Teniendo en cuenta lo anterior, resulta útil valorar los parámetros a medir según el método y la instrumentación que tiene la caldera para su operación, para tomar decisiones sobre la necesidad y posibilidad de medición de parámetros.
- El balance indirecto proporciona la posibilidad de analizar por separado cada pérdida y determinar los posibles puntos de ineficiencia del equipo. El balance

directo permite con más facilidad, dadas las características de los parámetros a medir en él, la automatización de la evaluación de la eficiencia con que opera la caldera.

- Ambos métodos implican la medición de parámetros en cuyo proceso pueden cometerse errores. La exactitud del resultado queda definida por la calidad de las mediciones (instrumentos y cuidado en su empleo) y no por el método empleado.

Por todo lo apuntado anteriormente se recomienda que siempre que sea factible se apliquen ambos métodos y sus resultados se comparen para tratar de obtener una valoración más exacta del trabajo del generador de vapor (Rubio Gonzales, 2015).

## **1.7 Criterios termoeconómicos y de sostenibilidad ecosistémica.**

### **Productividad termoeconómica (P<sub>Te</sub>).**

Expresa el valor de la producción mercantil (para una empresa de producción o servicios) o el valor del presupuesto ejecutado (para una entidad no empresarial) que se obtiene a partir del consumo de una cantidad de energía durante su funcionamiento durante un mes o un año. Sus unidades de medida son (cup/GJ. año). Cada sector o rama de la economía debe trazar este nuevo indicador a partir de los valores existentes de la intensidad energética (**IE**) de los registros estadísticos (modelo 5073). En Cuba se pueden esperar valores entre 10-10000 (cup/GJ. año) según sea el tipo de institución o entidad (Vizcón, 2021).

La productividad termoeconómica también se puede obtener a partir de los factores internos que dependen en el proceso de producción mercantil, tales como: el costo termoeconómico del proceso (**CT<sub>e</sub>**), el costo anual sin considerar los relacionados con el combustible y sus instalaciones de transformación, (**CT otros**), la ganancia anual de la institución, (**Ga**) expresada en cup/año (Vizcón Toledo & otros, 2022).

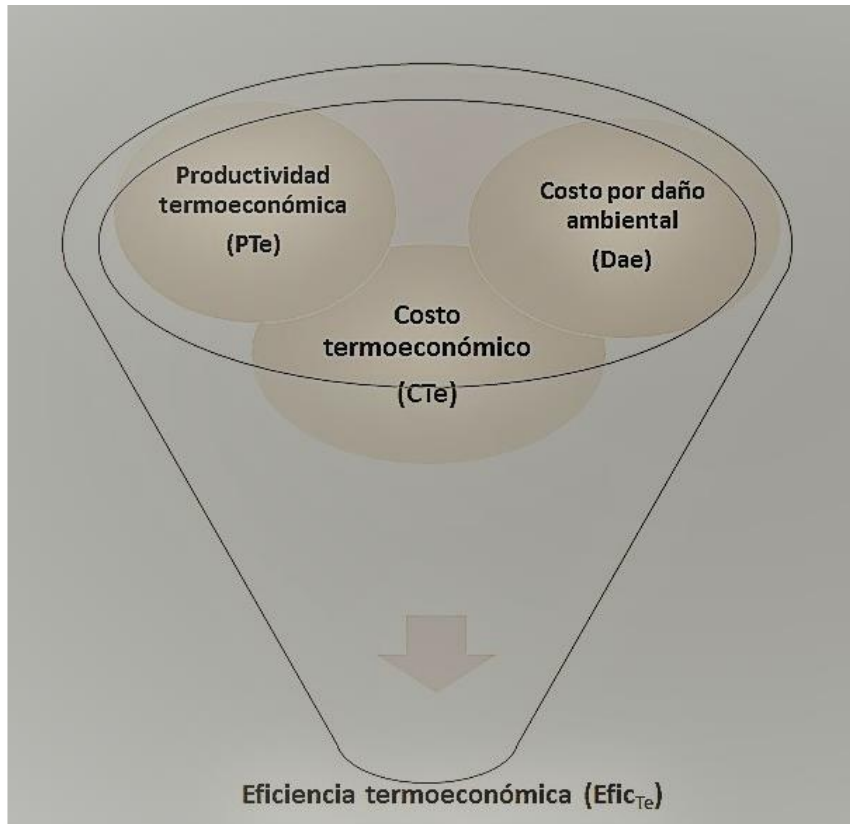
La productividad termoeconómica permite conocer la producción de valores de una institución relacionada con la cantidad de energía que debió utilizar para ello, siendo una necesaria característica o cualidad a conocer en la actualidad, aún no permite valorar cuánto más podría mejorarse el funcionamiento con orientación a ser un proceso que contribuya a la sostenibilidad ambiental. Es entonces que se define la eficiencia termoeconómica de los procesos de producción y servicios (Vizcón, 2021).

### **Eficiencia termoeconómica (EficTE).**

Si bien la productividad termoeconómica permite conocer la producción de valores de una institución relacionada con la cantidad de energía que debió utilizar para ello, siendo una necesaria característica o cualidad a conocer en la actualidad, aún no permite valorar ¿cuánto más podría mejorarse el funcionamiento con orientación a ser un proceso que contribuya a la sostenibilidad ambiental? Es entonces que se define la eficiencia termoeconómica de los procesos de producción y servicios (Vizcón, 2021).

Sus valores comprendidos entre menor que uno y mayor que cero, suelen ser superiores a los calculados para los rendimientos energético y exergético de las instalaciones expresados adimensionalmente.

Se define entonces que la eficiencia termoeconómica de una entidad de producción o servicios es dada como la relación adimensional de la productividad termoeconómica respecto a ella misma sumada con el costo estimado por daño ambiental y el costo termoeconómico, estos dos últimos calculados para el proceso de transformación de la energía y a partir de las siguientes formulaciones que tienen un esquema de interrelación según la siguiente figura (Vizcón Toledo & otros, 2022):



*Figura 1.4 Interrelación conceptual entre índices de sostenibilidad energética y ambiental. Fuente: Dr. C. Roberto Vizcón Toledo.*

### **1.7.1 Costo termoeconómico.**

El costo termoeconómico de un proceso de transformación de energía en un sistema térmico se calcula al sumar los costos de:

- Las corrientes de exergía de entrada o gastadas,
- Los gastos anuales o la amortización del valor de la inversión (tecnología energética)
- Los gastos por operación y mantenimiento del STE o la tecnología energética
- Los gastos estimados por daño ambiental que provoca el uso de combustibles de origen fósil.

Entonces el costo termoeconómico de las corrientes de exergía útiles generadas será igual al costo termoeconómico del STE calculado, en este caso se asume como que no existen costos asociados a las corrientes de exergía pérdidas y destruidas, esto último es solo una

consideración para asociar las ganancias al único producto con valor asociado (exergía útil).

El costo termoeconómico por las exergías perdidas y destruidas se utiliza en la ecuación de cálculo del factor exergo económico y su monto se calcula con el valor calculado de exergías perdidas y destruidas multiplicadas por el costo exergético unitario de la exergía de entrada al sistema. Las unidades de medida del costo termoeconómico y de todos los componentes de costos de su ecuación de cálculo son: \$/GJ, en todos los casos se requiere de un periodo de tiempo de funcionamiento en el cual se realiza la evaluación.

## **1.8 Combustibles fósiles.**

Se derivan los combustibles fósiles de materia orgánica que se ha entrampado entre las capas de sedimentos dentro de la Tierra por millones de años (Abas N., 2015).

Hay tres tipos de combustibles fósiles:

1. El carbón es el combustible fósil más abundante y se espera que los suministros duren mucho más tiempo que otros combustibles fósiles.
2. El petróleo es un líquido de alto contenido de carbono formado de vegetación y animales fósiles. Se encuentran depósitos de aceite intercalado entre las piedras en la Tierra. En los pozos perforados las cañerías se hunden abajo de los depósitos para bombear el aceite fuera.
3. El gas natural, es el combustible fósil más eficaz, barato y limpio para convertirlo en energía utilizable.

### **1.8.1 El gas natural.**

El gas natural es un hidrocarburo que puede encontrarse en yacimientos y cuyo componente esencial es metano, se define como la mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, donde la mayor proporción corresponde al metano en un valor que oscila entre el 80 % y 95 %. Mundialmente, en 2003, el gas natural ocupaba el tercer lugar entre las fuentes de energía primaria con un 24% del total (Arias, 2006).

En Cuba no se utilizan en una medida importante los combustibles gaseosos para la generación de vapor, no obstante, dado el ritmo de crecimiento de la extracción de petróleo y la existencia de ciertas reservas de gas, hace presuponer que en los próximos años se

incremente su utilización, aunque no en una magnitud muy significativa. En estos momentos ya está decidida la instalación de la primera termoeléctrica de gas que será de 100 MW. Ahora bien, a nivel mundial los combustibles gaseosos son ampliamente utilizados para la generación eléctrica en centrales termoeléctricas, e incluso, en otras industrias, incluyendo la azucarera como es el caso de Argentina (Rubio Gonzales, 2015).

Los combustibles gaseosos presentan características muy favorables como son:

- Facilidad de extracción y transportación.
- Alto calor específico de combustión.
- Ausencia de ceniza y por lo tanto de residuos.
- Economía de operación por su bajo costo.
- Fácil automatización de la operación.

Los usos más comunes del gas natural son:

- Aplicación Doméstica.
- Aplicación Comercial.
- Aplicación Industrial.
- Cogeneración Termoeléctrica.

La composición de los combustibles gaseosos según (Rubio Gonzales, 2015) se acostumbra a dar en fracciones o porcentos volumétricos de sus gases constituyentes, así se tiene, por ejemplo:

$$H_2 + CO + H_2S + C_m H_n + N_2 + CO_2 + H_2O = 100\% \quad (1.1)$$

Los cálculos con estos elementos gaseosos se hacen siempre para condiciones normales, es decir, expresándolos en m<sub>3</sub>N lo que se corresponde con la medición del volumen a 101,325 kPa de presión y 0 °C de temperatura.

Los combustibles gaseosos son de dos tipos:

- Naturales.
- Artificiales.

Los combustibles gaseosos naturales están constituidos por una mezcla de hidrocarburos, sulfuros, nitrógeno y gases inertes; sus componentes principales son:

- Metano (CH<sub>4</sub>): 90 - 98 %
- Hidrocarburos de la serie del metano: 0,1 - 75 %
- Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 0,1 - 0,3 %
- Nitrógeno (N): 1 - 14 %

Contiene, además, vapor de agua y trazas de impurezas minerales no combustibles.

Su calor específico de combustión oscila entre 33 500 y 35 500 kJ/m<sup>3</sup>N.

### **1.8.2 Gas Natural Licuado (GNL).**

El GNL es gas natural que ha sido sometido a un proceso de licuefacción, que consiste en llevarlo a una temperatura aproximada de -1600C con lo que se consigue reducir su volumen en 600 veces. Esto permite transportar una cantidad importante de gas en buques llamados metaneros. El GNL se halla en estado líquido mientras que el gas seco (que viaja por gasoducto) se encuentra en estado gaseoso (Arias, 2006).

### **1.8.3 Principales propiedades del Fueloil.**

#### **Viscosidad**

La viscosidad del fueloil tiene que ver con su atomización en la tobera del quemador. Partiendo de que la tobera de los quemadores atomiza un combustible eficiente sólo cuando este está dentro de ciertos rangos de viscosidad, la viscosidad y la relación viscosidad-temperatura determinan la temperatura a la cual este debe ser precalentado. Para lograr un correcto uso del fueloil éste debe estar dentro de ciertos límites de viscosidad para minimizar los requerimientos de ajustes en el quemador. Si la viscosidad del combustible en el quemador es demasiado alta, la atomización es pobre y hay una depresión excesiva de carbono, si la viscosidad es muy baja ocurre el retroceso y puede resultar un quemado errático. La viscosidad también está relacionada con las precisiones de bombeo del combustible y con los costos de bombeo y es de primordial importancia para los grados más pesados que requieren de precalentamiento antes de ser quemados (Félix, 2019).



### **Punto de inflamación**

El punto de inflamación es el valor de temperatura a la que debe calentarse el combustible, para que desprenda suficiente vapor y forme una mezcla inflamable con el aire, después de exponerlo a una llama. Para medir el punto de inflamación en los combustibles se usa el aparato de Pensky- Martens copa cerrada, la metodología para esta prueba se establece según la norma ASTM D93 con la particularidad de que se subdivide en dos procedimientos que se aplican según el tipo de sustancia a analizar

- Procedimiento A: Aplicable a destilados, aceites lubricantes nuevos y otros petróleos homogéneos y líquidos que no se incluyen en el procedimiento B.
- Procedimiento B: Aplicable a residuales de combustibles, aceites lubricantes usados, mezclas de petróleos líquidos con sólidos.

### **Valor calórico**

La importancia del valor calórico es de por sí evidente, en general, el fueloil obtenido a partir de lotes craqueados tiene una mayor densidad y un mayor valor calórico en base a kWh/litro que el fueloil de destilación primaria también en base al volumen el valor calórico aumenta, en general los valores típicos son alrededor de 10 a 15 kWh/litro (Félix, 2019).

### **Contenido de Azufre**

El por ciento en peso del azufre en el fueloil varía desde unas pocas décimas (0,1-0,5) de por ciento para destilados hasta por cientos tan altos como siete para algunos aceites residuales debido a que el 20 % de los compuestos presentes en el producto pueden contener azufre, la eliminación de este puede resultar en una gran reducción de la cantidad de fueloil después del tratamiento, no todos los compuestos sulfurados son corrosivos. Tenemos también que el azufre se quema fácilmente y tiene un valor calórico bastante alto, alrededor de 3 kWh/kg, comparado con 9 kWh/kg para el carbón, por lo tanto, su presencia no es generalmente objetable, excepto para ciertas aplicaciones.

El azufre es inconveniente, por ejemplo, en economizadores, los cuales enfrían los gases de la combustión por debajo del punto de rocío del agua, en ciertas operaciones

metalúrgicas y en combustibles utilizados en la calefacción doméstica. El azufre y los compuestos sulfurosos existen bajo diversas formas en el crudo. Los procesos de tratamiento en refinería son capaces de eliminarlos o transformarlos en mayor o menor grado. Entre los compuestos del azufre se distinguen, el azufre corrosivo y el azufre total.

### **Contaminación.**

Junto con la viscosidad la presencia de materiales contaminadores en el combustible puede tener efectos muy marcados sobre la eficiencia y la calidad de la combustión. Estos elementos, los cuales pueden ser introducidos en la manipulación o en el almacenamiento previo a su uso, son el agua, otros productos del petróleo, polvo, o materiales orgánicos fibrosos. La contaminación puede ser también el resultado de cambios químicos o físicos que ocurren en el combustible durante su almacenamiento o durante la combustión. El enfriamiento del combustible puede causar que algunos de los materiales sólidos en solución precipiten. Calentando el combustible, se pueden acelerar la sedimentación, produciendo reacciones químicas, estos materiales se asientan y se acumulan como un sedimento en el fondo del recipiente de almacenamiento.

Contaminaciones de este tipo pueden causar interrupciones en la boquilla del quemador o en los filtros y erosión en las partes mecánicas.

Los depósitos de materiales carburosos o materiales minerales pueden ser acumulados durante la combustión en algunos tipos de quemadores. Los depósitos carbonosos se correlacionan con el residuo de carbono del producto, el cual se determina por medio de la vaporización y pirolisis de una muestra del mismo bajo condiciones prescritas. Los materiales minerales están ligados con el contenido de cenizas del producto (Félix, 2019).

### **Contenido de agua**

El agua puede ser causa de una combustión errática y de una llama inestable es por eso que se considera de suma importancia controlar el por ciento de agua y sedimentos que poseen todos los combustibles fósiles especialmente los líquidos como el fueloil y el Diesel.

## **1.9 Eficiencia energética.**

Eficiencia energética implica lograr un nivel de producción o servicios, con los requisitos establecidos por el usuario, con el menor consumo y gasto energético posible, y la menor contaminación ambiental. Es menos consumo de energía por unidad de producto o servicio, es optimizar la relación entre la energía consumida y los productos obtenidos (Campos, 2008).

La eficiencia energética tiene en cuenta todos los cambios que resultan en una disminución de la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de actividad económica o para satisfacer los requerimientos energéticos de los servicios que requieren las personas, asegurando igual o superior nivel de confort (Campos, 2008).

### **1.9.1 Eficiencia energética en sistemas de uso de energía no renovable.**

La importancia de reducir el consumo de estas fuentes primarias se ha transformado de un problema económico a un problema vital, y de un problema vital del futuro a uno de los mayores accidentes que ya padecemos en el desarrollo de la humanidad. La acidez de las lluvias, las catástrofes naturales, las consecuencias del efecto invernadero y de la disminución de la capa de ozono, son secuelas que debemos curar con una nueva vía de producción energética que recorre desde el control de los procesos actuales y el incremento de su eficiencia hasta el cambio de estructuras a una utilización descentralizada de las fuentes renovables, inagotables y de bajo impacto ambiental (Campos, 2008).

### **1.10 Impacto ambiental debido a la combustión.**

El uso de combustibles fósiles como el gas licuado del petróleo (GLP), diésel y fuel oil en el proceso de producción de vapor tiene un elevado costo ambiental si se toma en cuenta que los mismos provienen de fuentes no renovables. Tal situación unida a la gran cantidad de equipos instalados con elevados grados de sobredimensionamiento y baja eficiencia provoca que la generación de vapor contribuya de manera negativa al impacto ambiental por concepto de emisiones de CO<sub>2</sub> (Celestino, 2006).

La presencia de sustancias contaminantes en el aire atmosférico ha conducido a la necesidad de establecer normas de Concentraciones Máximas Admisibles para dichas sustancias nocivas en la atmósfera.

*Tabla 1.2 Normas de Concentraciones Máximas de Contaminantes Atmosféricos.*

<i>Contaminantes</i>	<i>Formula química</i>	<i>Concentraciones máximas admisibles (CMA)</i> <i>(miligramos / metro cúbico)</i>	
		<i>Máx. Instantáneo</i> <i>(en 20 minutos)</i>	<i>Media diaria</i> <i>(Promedio en 24 horas)</i>
<i>Benzo-a-pireno</i>	$C_{20}H_{12}$	-	$1 \times 10^{-6}$
<i>Dióxido de Azufre</i>	$SO_2$	0,5	0,05
<i>Dióxido de Nitrógeno</i>	$NO_2$	0,085	0,04
<i>Hollín</i>	C	0,15	0,05
<i>Monóxido de Carbono</i>	CO	5,0	3,00
<i>Monóxido de Nitrógeno</i>	NO	0,6	0,06
<i>Pentóxido de Vanadio</i>	$V_2O_5$	-	0,002

En la Tabla 1.1 se muestran las concentraciones máximas admisibles de los principales contaminantes emitidos a través de las chimeneas de las Calderas, según la norma cubana que está vigente actualmente.

Los textos clásicos de la termodinámica, tales como (Cengel Y. A., 2014), (A, G, & M., 1996), (Moran, 2018), (Cengel C. T., 2017), (Powers, 2017) entre muchos, no abordan el concepto de rendimiento energético según la 1ra Ley de la termodinámica con la formulación segmentada o subdividida en: energías renovables y no renovables; y tampoco con la consideración del uso, o no uso, de las tecnologías energéticas de máximo potencial.

En su tesis doctoral (Ocañas, 2006) planteó una metodología que cuantifica integralmente los daños ambientales por uso de la energía a partir del criterio sobre la Sostenibilidad Energética Ambiental. Se parte de valorar la incidencia de cuatro factores necesarios que son:

- Grado de renovabilidad de la energía consumida en el sistema,  $\alpha$
- Eficiencia de las transformaciones energéticas,  $\beta$
- Grado de limpieza de la energía consumida,  $\gamma$
- Grado de Auto abastecimiento energético territorial del sistema,  $\lambda$

Donde los factores de peso de cada uno son:  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\beta$ ,  $\sigma_\gamma$ , y  $\sigma_\lambda$

El mismo Ocañas propone entonces, como índice de sostenibilidad energético ambiental (Ise) la expresión matemática siguiente:

$$Ise = \sigma_\alpha * \alpha + \sigma_\beta * \beta + \sigma_\gamma * \gamma + \sigma_\lambda * \lambda \quad (1.2)$$

El valor calculado de Ise siempre será un número menor que uno, pues en ningún caso las transformaciones energéticas logran la perfección termodinámica y ambiental.

Según el doctor cubano (Camaraza, 2019) es posible estimar el monto financiero del daño ambiental por dos componentes, estas son las emisiones de gases de efecto invernadero por combustión de combustibles fósiles y también por el consumo del agua potable, esto basado en informes de (Oficina nacional de estadísticas de Cuba, 2016), (Asdrubali F, 2015) y (Söshret Y, 2017).

### **1.11 Conclusiones parciales del Capítulo.**

- Se caracterizaron las calderas de vapor haciendo énfasis en las calderas piro-tubulares, así como sus mecanismos de transferencia de calor y principales usos en la industria.
- Se coincide con la necesidad de conocer y poder calcular la eficiencia energética en el uso de las fuentes no renovables de energía debido a la incidencia que esto tiene en la economía y el impacto ambiental de Cuba
- Se escogieron los métodos de cálculo de eficiencia del generador de vapor por el método directo e indirecto según la literatura especializada.
- Se plantearon criterios termoeconómicos y de sostenibilidad ecosistémica.
- Se consideran aceptadas las consideraciones relativas a los índices de desempeño energético a la luz de la Norma NC ISO 5001.
- Se realizó un estudio del impacto ambiental debido a la combustión en las calderas.

## **Capítulo 2 Métodos y materiales.**

Se describe el proceso de generación de vapor en la instalación objeto de estudio, así como cada una de las etapas y equipos que intervienen en dicho proceso. Se plantean las metodologías de cálculo para determinar la eficiencia bruta de operación de la caldera No.5 de la Planta de Procesamiento de Crudo de E.P.E.P. Centro, así como sus índices de desempeño energético productividad termoeconómica, costo termoeconómico, daño ambiental estimado y eficiencia termoeconómica, para la posterior realización de un software de calculo que permitirá evaluar la caldera después de ser reparada y remodelada. Esto permitirá conocer con mayor precisión el aprovechamiento del combustible consumido.

### **2.1 Descripción general del proceso.**

La descripción del proceso fue elaborada a partir de (E.P.E.P. Centro., 2000).

El proceso de producción de vapor se basa en la elevación de la temperatura del agua tratada en el interior de las calderas, hasta que alcance el punto de ebullición a una presión determinada, lo que provoca su cambio de estado de líquido a vapor, para esto, se quema el combustible en el horno de la caldera, produciendo gran cantidad de gases a elevada temperatura (~1600 °C), los cuales recorren por la acción del tiro forzado el tubo central de fuego y los fluses, saliendo por la chimenea, entregando cierta cantidad de calor (en dependencia del grado de limpieza de las superficies de intercambio térmico y de la eficiencia de la combustión) al agua contenida dentro del casco de la Caldera.

Estos equipos están dotados de todo el equipamiento auxiliar necesario para su explotación, como son: ventiladores secundarios y primarios, copas, distribuidores, válvulas de seguridad, válvulas de extracción de fondo y de superficie, niveles visuales de agua, trampas de vapor, sistemas para el tratamiento interno del agua en la caldera, toma muestras de agua, instrumentos de medición de presión y temperatura.

Cada caldera posee una pizarra eléctrica mediante la cual se opera la misma y tiene señales lumínicas que indican: pizarra energizada, bajo nivel de agua, extra bajo nivel de agua y fallo de llama. Además, poseen una alarma sonora que acciona ante determinados fallos en la misma. También tienen un selector para el régimen de trabajo de la caldera ya sea bajo fuego o alto fuego y un selector para el régimen de trabajo de la caldera ya sea con gas o petróleo como combustible.

Cada caldera tiene una salida de vapor que entra a un colector general situado dentro de la Sala de Calderas de donde se distribuye el vapor hacia todas las partes del proceso de la Planta de Procesamiento de Crudos.

El proceso de producción de la Planta de Agua comienza en las bombas de pozo profundo, donde se obtiene del manto freático el volumen de agua necesario para el proceso de tratamiento de agua y para el sistema contra incendio, estas bombas envían el agua al tanque de 64 m<sup>3</sup> el cual la recibe y almacena.

De este con bombas Grundfos se bombea a los suavizadores por la parte superior del mismo. El agua intercambia con la resina los iones calcio y magnesio por iones sodio, eliminando la dureza del agua, pasa a través del lecho de resina y sale por la parte inferior hacia el tanque de agua tratada de 400 m<sup>3</sup> de capacidad, de donde automáticamente se bombea con 2 bombas hacia el Desareador, que se interconecta con la succión de las bombas de agua de alimentación de cada Caldera. A este Desareador también se bombea de forma automática condensado con 2 bombas Grundfos, después de pasar por un tanque de Flasheo. Este condensado es recuperado de los intercambiadores de la SES y la ECO.

Durante el suavizamiento se controla la calidad del agua a la salida mediante el método de análisis de valoración con EDTA, este se hace cada media hora y según las necesidades del proceso.



## 2.2 Descripción de cada una de las etapas y equipos del proceso.

### Sistema de alimentación de agua.

El agua cruda procedente de los pozos profundos es bombeada hacia el tanque de recepción de 64 m<sup>3</sup> de capacidad con 3 bombas de profundidad, de aquí se bombea con 2 Bombas Grundfos (1 repuesto) de agua cruda hacia los suavizadores donde entra por la parte superior atravesando la capa de resina catiónica para intercambiar iones Calcio y Magnesio del agua cruda por iones Sodio de la resina para eliminar su dureza. El suavizamiento de agua está basado en el principio químico de intercambio de iones.

El agua entra a los Suavizadores con la dureza total del agua cruda máxima de 750 ppm (mg/L) y sale por la parte inferior con dureza total 0-4 ppm (mg/L) hacia el tanque de agua tratada de 400 m<sup>3</sup> de capacidad. De este tanque se bombea automáticamente con 2 bombas hacia el Desareador de donde se alimentan la succión de las bombas de agua de alimentación de cada Caldera. A este (Desareador) también se bombea de forma automática condensado con 2 bombas Grundfos, después de pasar por un tanque Flasheo. Este condensado es recuperado de los intercambiadores de la SES y la ECO. En la línea de alimentación de agua a cada caldera (descarga de bombas de alimentación), se añade el producto de tratamiento interno del agua de calderas.

En el proceso de suavizamiento del agua la resina intercambiadora se agota y deja de captar los iones Calcio y Magnesio, por lo que es necesaria su regeneración, esta consta de 4 pasos:

**Contra lavado:** Se realiza en contracorriente de abajo hacia arriba con el objetivo de expandir la resina y eliminar suciedades que hayan sido atrapadas. Este está regulado de forma que no se pierda resina. Se realiza hasta que el agua salga totalmente limpia.

**Inyección de la Salmuera:** Su objetivo es la devolución de las propiedades intercambiadoras a la resina, una vez agotada su capacidad de intercambio. Para esto, se prepara la solución de salmuera, se adicionan los sacos de sal y se añade agua en la piscina, dejando un tiempo de reposo mínimo de 2 horas, se chequea el nivel del tanque y se abre

la válvula de la piscina #10 y se enciende la bomba, se comprueba si la piscina tiene el 26% de concentración de salmuera, midiendo la densidad que oscile entre 1.19-1.2 g/cm<sup>3</sup>. Después se regula su inyección, de 8-15%, midiendo la densidad que oscile entre 1.06-1.09 g/cm<sup>3</sup> en el tomamuestras instalado en cada suavizador en la línea de inyección de sal. Este proceso de inyección de salmuera dura de 45-60 min.

**Desplazamiento:** Se hace con el objetivo de desplazar toda la salmuera del interior del suavizador. Este se detiene cuando se elimina el sabor salino y cuando los cloruros son iguales a los del agua cruda.

**Enjuague:** Se hace con el objetivo de eliminar residuos de dureza y cloruros. Se realiza hasta que, por análisis, la Dt = 0 y Cl = Cl agua cruda. Esta operación se realiza cada vez que se vaya a poner en servicio un suavizador después de una parada larga o regeneración.

Posterior al proceso de suavizamiento, es almacenada el agua en el tanque de 400 m<sup>3</sup> y enviada al desgasificador térmico de tipo cascada. La presión de funcionamiento normal de este desgasificador estará comprendida sobre los 20 a 40 kPa efectivos (manométricos) para así garantizar una temperatura del agua de aproximadamente 105 °C.

El desgasificador se diseña para recibir indistintamente agua de aporte tratada a 20 °C de temperatura y aguas procedentes de condensados a 95 °C con dos grupos independientes de regulación de entrada, que recibirá la señal de un sólo controlador de nivel (transmisor presión diferencial) colocando en el depósito de almacenamiento de agua existente. El agua desgasificada se almacena en el depósito situado debajo del desgasificador a una temperatura comprendida entre 100 y 103 °C y desde allí se enviará mediante grupos de motobombas a los generadores de vapor. Esta agua de alimentación a las calderas es aditivada con productos químicos en la línea de descarga de las bombas de alimentación.

Las variables de control del Desgasificador tales como: presión y regulación de vapor, temperatura, nivel del tanque de alimentación son controladas y registradas en el Sistema Supervisorio WinCC instalado.

Cuando sale de servicio el Desgasificador Térmico se utiliza la línea del bypass de salida del tanque de agua tratada y la línea de interconexión de condensado recuperado hacia el colector de succión de las Bombas de Alimentación a Calderas.



*Figura 2.3 Diagrama monolineal Agua Vapor. Fuente: Elaboración propia.*

Leyenda:



Agua cruda.



Bomba de agua.



Planta de tratamiento de agua.



Tanque de alimentar.



Bomba de agua.



Volumen de agua.



Volumen de vapor.



Salida del vapor.

## **Sistema de alimentación de combustible.**

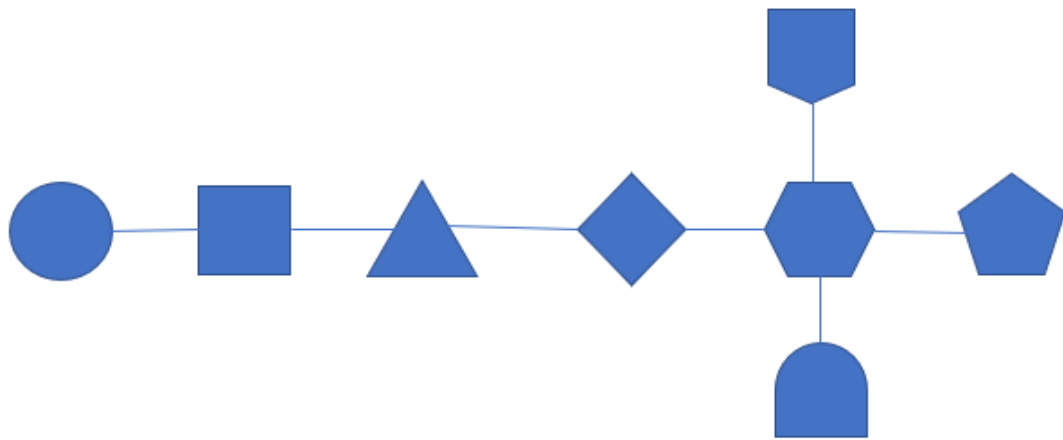
En esta instalación existen dos variantes de alimentación de combustible a los Generadores de Vapor:

Crudo Nacional Ligerero. °API (14.7-14.9), BSW menor o igual a 2 %. La alimentación con crudo nacional se realiza solo en casos eventuales. El combustible llega por pailas a la instalación y se descarga en el tanque de 100 m<sup>3</sup>, con dos bombas de engranes tipo Worthington y lo envían hacia los tanques de consumo de 25 m<sup>3</sup>; estos tanques están provistos de serpentines para el calentamiento del combustible, indicadores de nivel, termómetros y drenajes. De aquí va a la bomba del lazo de combustible la cual se encarga de pasarlo por los intercambiadores de calor y entregarlo a la succión de las bombas de combustibles del quemador de cada Caldera, el retorno de combustible no utilizado puede ir al tanque o a la succión de la bomba del lazo. Antes de cada equipo de bombeo, están los filtros, encargados de retener las suciedades que traiga el combustible, evitando las obstrucciones. El gas para el encendido de las calderas proviene de los botellones almacenados en un cuarto situado fuera de la Sala de Calderas.

Gas limpio procedente de ENER GAS. El gas proveniente de ENER GAS con una presión de 0.1-0.5 MPa pasa por una válvula reguladora de acción neumática setead a valores entre 0.1 -0.2 MPa va al separador de arrastre el cual elimina las partículas de agua, las cuales se acumulan en el fondo del separador y son evacuadas por la línea de purga; está provisto de una válvula de seguridad, conectada a un Flare para la evacuación del gas en caso de sobre presiones. Su salida se incorpora a la electroválvula de gas y de este al tren de gas de cada Caldera, donde la presión oscila entre los valores de 8 a 15 kPa. El Tren de Válvulas de Gas está compuesto por una serie de válvulas, instrumentos y accesorios, que suministran de forma regulada y con un máximo de seguridad el gas procedente del separador hasta los quemadores de las calderas. Los elementos que integran este complejo son:

- Válvulas de cierre rápido.
- Filtros.
- Válvula reguladora de presión.


- Flujómetros.
- Válvula doble de gas.
- Válvula de seguridad.
- Manómetros de alta.
- Presostatos de alta y mínima.
- Válvulas solenoides.
- Visor detector de fugas.
- Válvulas moduladoras.
- Gas para encendido de las Calderas Estas Calderas utilizan el gas metano para su encendido, el mismo proviene de botellones almacenados para tal efecto en un cuarto aledaño a la Sala de Calderas. Cuando se trabaja con petróleo para el encendido es el mismo gas de consumo.



*Figura 2.2 Diagrama monolineal del flujo de combustible. Fuente: Elaboración propia.*

Leyenda:


 Almacenamiento.

 Bomba de impulsión.

 Filtros.

 Calentadores.

 Quemador.

 Gases de combustión.

 Aire.

 Chispa.

### **Sistema de Residuales.**

Todos los residuales líquidos de la Sala de Calderas van a una cisterna fundida, a un nivel inferior al terreno, con capacidad aproximada de 70 m<sup>3</sup>, de ahí se succionan con una bomba centrífuga y se envían al separador de 10 000 m<sup>3</sup> donde lo succiona otra bomba y lo envía para el Sistema de Tratamiento de Residuales de la Planta de Procesamiento de Crudos. Las extracciones de fondo de las Calderas de la instalación van a un Expansor, donde el vapor va a la atmósfera y el agua caliente al separador de 10 000 m<sup>3</sup>.

### **Sistema de Condensado.**

En la instalación, el condensado que se recupera es el de los intercambiadores de la Segunda Etapa de Separación del Área de Tratamiento y los Intercambiadores del Área de Ventas, los cuales van a un Expansor donde se separa el revaporizado que se expulsa a la atmósfera y el agua caliente va al tanque de condensado de 40 m<sup>3</sup>, de aquí es bombeado por dos bombas centrífugas hacia el desareador, donde se une el condensado recuperado y el agua tratada de reposición, pasando a la succión de las bombas de cada Caldera. En el tanque de condensado existe un toma muestra para chequear la posible contaminación del mismo donde se chequea según la secuencia orientada, este tanque tiene dentro una plancha de división de arriba hacia abajo, separada del fondo a 41 cm para evitar una posible contaminación del condensado con petróleo y que le dé tiempo al Operador de realizar sus operaciones para evitar que el condensado contaminado llegue a las Calderas. Existen las

interconexiones necesarias para la evacuación de este condensado al Sistema de Residuales de estar contaminado.

### **Generación y Distribución de vapor.**

Se cuenta con cinco Calderas piro tubulares donde los gases calientes transitan por dentro de los tubos cediendo la energía calorífica al agua, permitiendo la generación de vapor de agua saturado.

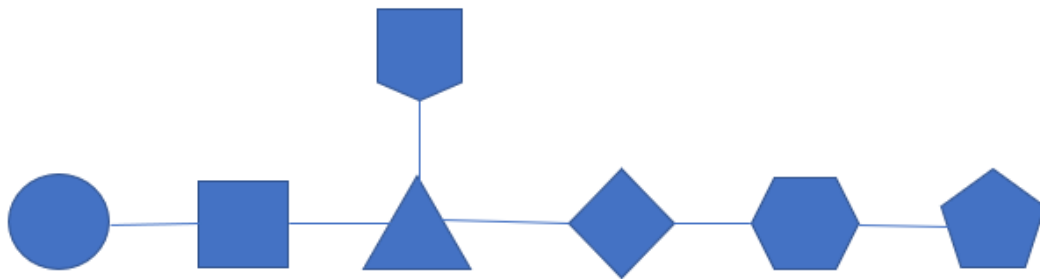
Los Generadores de Vapor Piro tubular de 10 t/h de producción de vapor y 1 MPa de presión máxima de operación, incluyen:

- Sistema de Combustión Dual (Gas Natural y Petróleo), de Copa Rotatoria, con el objetivo de garantizar de forma eficiente la combustión del petróleo crudo pesado.
- Sistema de suministro de Gas Natural al quemador (Tren de Gas, con válvulas de regulación y control.
- Sistema de alimentación de agua y extracciones de fondo y purga continua.
- Sistema de medición del consumo de combustible líquido (petróleo pesado) y Gas Natural, además de la medición del vapor producido.
- Sistema de suministro de Aire para la Combustión (ventilador de tiro forzado). Pizarras de control (incluye el autómatas de operaciones) e instrumentación asociada al Generador de Vapor.
- Sistema de alimentación continua de agua al Generador de Vapor. Válvulas de seguridad y válvula de explosión del conducto de los gases. Bombas de Alimentación de Agua al Generador de Vapor, la chimenea y el conducto de salida de los gases.

La distribución de vapor (colector), está formado por una tubería de 16" (406.4 mm) de diámetro, cerrada en los extremos y aislada térmicamente, a la que están conectadas las líneas de salida de vapor de las Calderas, cada una con su válvula correspondiente. De este colector salen todas las líneas para los tanques e intercambiadores de la planta. Una línea de 2" (50.8 mm) para otro colector de 4" (101.6 mm) de diámetro del cual salen para los tanques de almacenamiento de combustible de 70 m<sup>3</sup>, de consumo de 25 m<sup>3</sup> y al calentador del lazo de combustible. Una línea de 10" (254 mm) de diámetro para los intercambiadores, una línea para la ECO, una línea para el tanque 14, una para los tanques de tratamiento del crudo, otra para el Desgasificador, una de 1" (25.4 mm) que va para la alarma sonora o pito, una línea de 1" (25.4 mm) para el Taller de Bombas y Agregados, otra de 1" (25.4

mm) para medir presión diferencial en el colector, una línea de 1/2" (12.7 mm) para el toma muestras de vapor. Este colector está equipado con instrumento para la medición de presión y temperatura del vapor y dispositivos para la purga y evacuación del condensado, así como de válvula de seguridad.

En el Sistema Supervisorio WinCC se registran los valores de salida de flujo de vapor de cada Generador, temperatura de gases combustión, presión y nivel en cada Generador, entre otras.



*Figura 2.1 Diagrama monolineal aire-gas. Fuente: Elaboración propia.*

Leyenda:



Aire atmosférico.



Ventilador de tiro forzado.



Quemador.



Cañón central de combustión.



Haces de tubos de humo (tres pases).





Chimenea.



Entrada de combustible.

## Equipos Fundamentales Sala de Calderas y Planta de Tratamiento de Agua.

La Sala de Calderas consta de cinco calderas piro tubulares (los gases calientes transitan por dentro de los tubos); el vapor producido es usado en las diferentes etapas del proceso.

### Calderas de 10 toneladas.

- Diámetro de salida de vapor..... DN 200 (8") (203 mm)
- Diámetro entrada alimentación de agua..... DN 50 (2") (50.8 mm)
- Diámetro de válvula de seguridad..... DN 50 (2") (50.8 mm)
- Diámetro de la purga..... DN 32 (1 1/4") (31.75 mm)
- Diámetro del drenaje..... DN 50 (2") (50.8 mm)
- Dimensiones de la chimenea..... 706 x 12000 mm
- Capacidad de generación..... 10 000 kg/h
- Temperatura del vapor.....160-183 °C
- Temperatura del agua de alimentar.....50-105 °C
- Temperatura de los gases.....180-235 °C
- Superficie de transferencia de calor ..... 286.7 m<sup>2</sup>
- Presión de trabajo nominal .....0.98 MPa
- Eficiencia calculada..... 87 %
- Consumo de combustible..... 720 kg/h
- Tipo de combustible..... Petróleo ligero
- Valor calórico inferior del combustible..... 9400 kcal/kg
- Consumo de combustible Gas......650 - 720 m<sup>3</sup>/ h
- Tipo de combustible.....Gas a bajas presiones
- Diámetro de hogar interior.....1260 mm
- Longitud del hogar.....5740 mm
- Longitud de los tubos.....6350 mm
- Tubos de fuego.....57.5 x 3 mm
- Cantidad de tubos de fuego..... 240
- Peso de la caldera seca.....30 000 kg
- Peso de la caldera llena.....56 400 kg
- Largo total de la caldera aproximado.....7300 mm
- Altura total de la caldera aproximado.....3670 mm
- Ancho total de la caldera aproximado..... 3550 mm
- Espesor del hogar.....20 mm

- Espesor de la placa.....20 mm
- Material del casco, hogar y placas.....Acero 20 k
- Tipo de quemador..... Copa rotatoria (RAY-EREBUS 800)
- Bomba de combustible..... Tornillo.

**Un tanque de almacenamiento de petróleo de 100 m<sup>3</sup> de capacidad.**

**Dos tanques de consumo diario de petróleo de capacidad de 25 m<sup>3</sup>.**

**Tres Suavizadores (M-48).**

Los 3 Suavizadores instalados en la Planta de Tratamiento de Agua son modelo M 48, están fabricados de acero estructural, revestido con goma resistente al ácido muriático, el espesor del revestimiento está en el orden de 3 a 5 mm.

Datos principales:

- Diámetro del equipo: 1 220 mm
- Altura total: 2 600 mm aproximada
- Diámetro nominal de tuberías: 2 ½ pulg (63.5 mm)
- Altura de resina: 800 – 900 mm
- Flujo de servicio: 40 m<sup>3</sup>/h
- Tipo de resina: Lewatit S 1467
- Regenerante: Sal Común en Granos
- Presión de diseño: 0.7 MPa
- Peso en operación: 3 600 kg (aproximado)

Contienen en su interior la resina intercambiadora de iones de alta capacidad del ciclo sodio y los difusores de entrada y salida del agua

**Piscina de Salmuera.**

Para la regeneración de esta Resina de Intercambio catiónico fuerte, la planta cuenta con una piscina de salmuera construida de bloques repellados, con dimensiones de: 1.7 m de ancho por 0.94 m de alto y 4.5 m de largo, con un elemento filtrante de grava.

**Tanque de Agua Cruda.**

Tanque de 64 m<sup>3</sup> de capacidad para el almacenamiento de agua cruda.

### **Tanque de Agua Tratada.**

Tanque de 411 m<sup>3</sup> de capacidad para almacenamiento de agua tratada.

Altura = 7.52 m

Diámetro = 8.53 m

### **Tanque de Condensado.**

Tanque de aproximadamente 40 m<sup>3</sup> de capacidad utilizado para recuperar el condensado de los Intercambiadores de la Segunda Etapa de Separación del área de Tratamiento y los de la Estación Cabecera del área de Ventas y el condensado del Tanque #6.

Longitud = 9.4 m

Diámetro = 2.4 m

### **Equipo desgasificador térmico y tanque de agua UMISA Modelo. DD-1/11(3).**

Este equipo consta de depósito desgasificador vertical situado encima del depósito de alimentación de agua horizontal. Ambos depósitos se encuentran interconectados por dos tubuladuras. En el interior se encuentran unas bandejas fabricadas en Acero Inoxidable AISI-316L que permite una correcta circulación del agua para desgasificar, esta caída del agua se produce de forma lineal para que se produzca el desplazamiento del CO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>.

El desgasificador está provisto de un manómetro de 0-0.6 MPa. Sobre el cuerpo del depósito de agua de alimentación se ha instalado un Termómetro en rangos de 0-150 °C y una sonda para medir temperatura del agua de alimentación de las Calderas. El sistema de alimentación de agua instalado permite alimentar al Desgasificador de forma continua con válvulas automáticas de regulación de flujo para la entrada de agua tratada y condensado recuperado, según la señal del transmisor de nivel del tanque de almacenamiento.

Funcionamiento de las válvulas automáticas para la regulación del flujo de alimentación al Desareador:

- El funcionamiento de las válvulas está asociado a las bombas de las líneas a las que pertenecen (condensado y agua tratada), y permanecerán cerradas si la bomba correspondiente está detenida.
- Las válvulas pueden operar de forma automática y manual.
- Las válvulas regulan el flujo de entrada para mantener un nivel de agua en el tanque del desareador promedio entre el nivel mínimo y máximo configurados a la bomba.
- La válvula de sobrellenado no se abrirá hasta que no se alcance el 75% de nivel en el tanque y no se cerrará hasta que haya alcanzado un nivel menor del 72 %.

### **Tres Bombas de Pozo Profundo Centrífuga Multietápica tipo SP 27-9.**

- $Q = 32 \text{ m}^3/\text{h}$
- $H = 97 \text{ mca}$  (0.97 MPa)
- Motor eléctrico de 15.24 cm (6") trifásico de 440 V
- Potencia: 11 kW

### **Dos Bombas de Agua Cruda: Grundfos.**

- $Q = 77 \text{ m}^3/\text{h}$
- $H = 65 \text{ mca}$  (0.60 MPa)
- Motor eléctrico trifásico de 440 V
- Potencia: 11 kW
- $I = 19.3 \text{ A}$
- 60 Hz
- 1700 r/min

### **Dos Bombas de Agua Tratada Tipo CRN-60-30.**

- $Q = 72 \text{ m}^3/\text{h}$
- $H = 1.01 \text{ MPa}$
- Motor eléctrico trifásico de 380-440 V
- Potencia: 18.5 kW
- $I = 34.1\text{-}35.9 \text{ A}$
- 60 Hz
- 2935 r/min

### **Cinco Bombas Dosificadoras de Tratamiento Interno CONCEPT PLUS CNPb de ProMinent.**

- $Q \text{ máx a } 1.0 \text{ MPa} = 2.4 \text{ L/h}$
- $P \text{ máx trabajo} = 1.0 \text{ MPa}$
- Motor eléctrico monofásico 110/220 V- 50/60 Hz
- Potencia: 11.1 W con 0.43-2.0 A

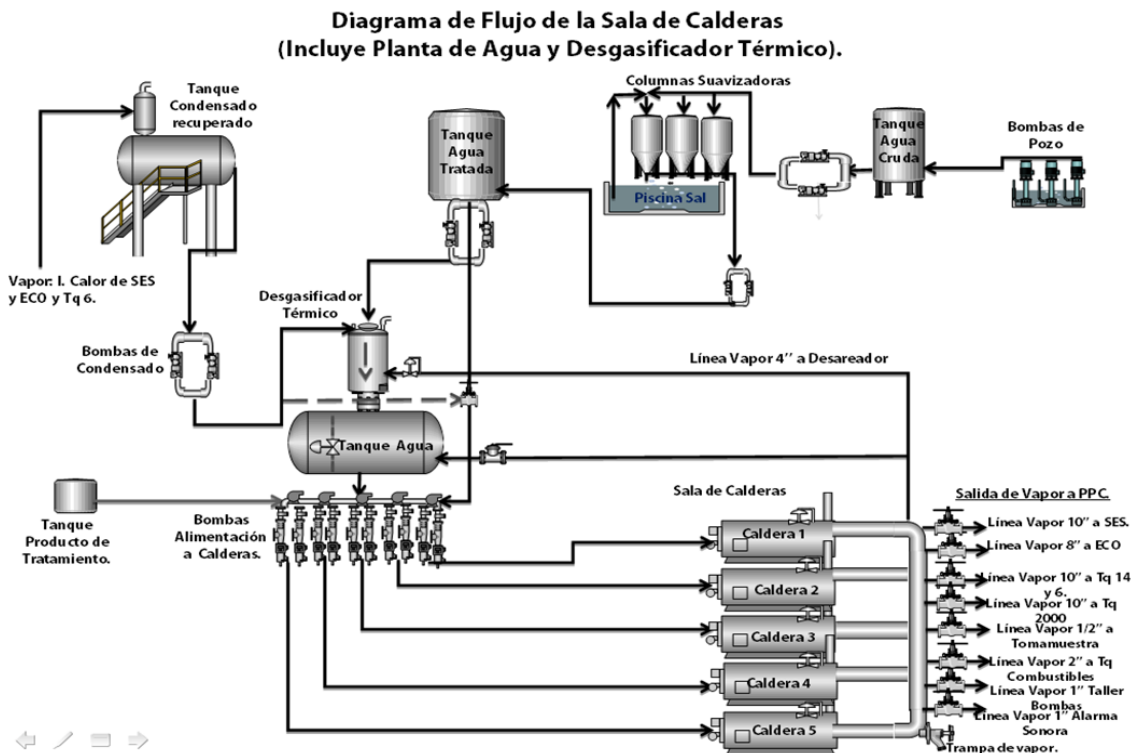
- Protección IP 66

### Dos Bombas de Condensado GRUNDFOS Tipo: CR45-2 -1K-F-A-E-HQQE

- $Q = 54 \text{ m}^3/\text{h}$
- $P \text{ máx} = 1.6 \text{ MPa}$
- $H \text{ máx.} = 67.8 \text{ m}$
- Temperatura =  $120 \text{ }^\circ\text{C}$
- Potencia: 11 kW
- Frecuencia: 60 Hz
- 3529 r/min

### Diez Bombas de Alimentación de Agua a Calderas GRUNDFOS Tipo: CRN 15-06 A-FGJ-G-E-HQQE.

- $Q = 20.5 \text{ m}^3/\text{h}$
- $P \text{ máx} = 2.5 \text{ MPa}$
- Temperatura =  $120 \text{ }^\circ\text{C}$
- $H \text{ máx.} = 123 \text{ m}$ ;  $H = 98.5 \text{ m}$
- Potencia: 11 kW
- 3529 r/min



*Figura 2.1 Diagrama de flujo de la sala de calderas y planta de agua. Fuente:  
Reglamento Tecnológico de Calderas y Planta de Agua.*

## **2.3 Secuencia de operaciones de arranque y parada de la caldera.**

### **2.3.1 Arranque desde condiciones de temperatura ambiente.**

- 1) Se energiza la pizarra de la caldera, así como del equipamiento auxiliar.
- 2) Se desconecta la alarma cuando se accione.
- 3) Se abre la válvula de entrada de gas a la caldera y entrada de gas al quemador.
- 4) Se abre la válvula reguladora de gas de la caldera.
- 5) Se abre la válvula de venteo de la caldera.
- 6) Se chequea que el nivel de agua en la caldera sea el operacional.
- 7) De no producirse el encendido, resetear la alarma; revisar todo el sistema y chequear los pasos anteriores, se limpia la celda fotoeléctrica y se repiten los pasos de arrancada, de repetirse el problema, se comunica al Tecnólogo A de Procesos Industriales o al J' de Turno.
- 8) Una vez arrancada la caldera, se espera a que comience la salida de vapor por la válvula de venteo, para que se evacue el aire del interior de la misma, seguidamente, se cierra el venteo.
- 9) Se abren las válvulas de alimentación de agua.
- 10) Se selecciona la bomba y se abren las válvulas de succión y descarga.
- 11) Se busca el nivel operacional realizando extracciones de fondo por las válvulas (alternando, las delanteras y traseras).
- 12) Al alcanzarse la presión de trabajo, se chequea:
  - Entrada automática de las bombas.
  - Parada automática de las bombas.
  - Bajos y extra bajos niveles de agua.
  - Fallo de llama.
  - Parada por presión.
  - Sonorización de la alarma en cada caso.
  - Válvulas de Seguridad.
- 13) Se comunica al Jefe de Turno la inminencia de la puesta en línea de la Caldera.
- 14) Se abre la válvula de drenaje del distribuidor (colector) de la Caldera.
- 15) Se abre lentamente la válvula de salida de vapor de la Caldera.
- 16) Se abre lentamente la válvula de entrada al colector.
- 17) Se habilita el vapor para los insumos de la Sala de Calderas, prestando atención al drenaje de los condensados y evitando los golpes térmicos.

### **2.3.2 Parada de la Instalación.**

- 1) Se coloca el selector de la bomba de alimentación de agua en posición manual, hasta que alcanza el nivel máximo.
- 2) Se pasa el selector de la bomba de agua de alimentar a automático.

- 3) Se pasa el interruptor de régimen de fuego del quemador a bajo fuego y después se lleva a la posición de OFF.
- 4) Se desconecta el breaker general de la pizarra colocándolo en OFF.
- 5) Se cierran las válvulas de alimentación de agua tanto a la entrada de la Caldera como en la descarga de la bomba.
- 6) Se cierra la válvula de entrada de gas principal a la Caldera.
- 7) Se cierra la válvula de entrada de gas al quemador.
- 8) Se cierra la válvula de encendido de gas al piloto.
- 9) En caso de paro general, se saca de servicio el separador de arrastre cerrándole la entrada de gas al mismo.
- 10) Se desaloja el gas acumulado por la válvula de desalojo al tubo Flare.

## **2.4 Modelo de libro de registro de parámetros de operación e incidencias del funcionamiento.**

**Se deben registrar los parámetros siguientes:**

- Presión de vapor en cada caldera funcionando.
- Presión de vapor en los colectores de vapor.
- Presión de combustible en el quemador.
- Temperatura del agua de alimentación.
- Temperatura del combustible en los tanques de consumo.
- Temperatura del combustible después del intercambiador del lazo.
- Temperatura de salida de los gases de cada Caldera.
- Nivel en los tanques de combustible.
- Nivel de agua en la Caldera.
- Funcionamiento de las Válvulas de Seguridad.
- Funcionamiento de los bajos y extra bajos niveles.
- Funcionamiento de la alarma.
- Funcionamiento de los presostatos de vapor en cada Caldera.
- Modulación en cada Caldera.
- Visualización de la combustión por la chimenea y por los visores de cada Caldera.
- Consumo de combustible diario (12:00 PM). Da los niveles y temperatura por tanques, en caso de que se esté consumiendo petróleo.
- Volumen de combustible recibido.
- Parámetros del combustible recibido.

Turno de día Op:																											
Turno de Noche Op:																											
Calderas	N°-1				N°-2				N°3				N°4				N°-5										
Horas	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6							
P. Vapor (MPa)																											
P. Comb (kPa)																											
T sal gases (°C)																											
Colector de Vapor																											
P. Vapor (MPa)					Horas				Ext. De Fondo				Nivel: Visual				Consumo Productos Químicos Agua Calderas (L)										
T. Vapor (°C)					Caldera 1																						
Temp. Tanque de Combustible					Caldera 2																						
Tq 1 (°C)					Caldera 3																						
Tq 2 (°C)					Caldera 4																						
Desgasificador Térmico																											
Tanque de H <sub>2</sub> O 0C					Caldera 5																						
Presión de Vapor (kPa)																											
Consumo Productos Químicos Líneas Vapor (L)				Hora				Caldera 1				Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4				Caldera 5			
Punto Dosificación	8am-8pm	8pm-8am		Total																							
Línea SES																											
Línea ECO																											
Incidencias																											

Figura 2.2 Modelo de libro de registro de parámetros de operación e incidencias del funcionamiento. Fuente: Reglamento Tecnológico de la Sala de Calderas y Planta de Tratamiento de Agua.

## 2.5 Limpieza de la Caldera.

### Necesidades:

- Desconectar eléctrica y mecánicamente la bomba de los descarbonatadores.
- Preparar platillo con nicle de 1” y colocar en succión y descarga.
- Conectar eléctricamente con una extensión al lado de la Caldera No 3 (que permita movilidad)
- Colocar platillo con niple 1” en una de las válvulas de la extracción de fondo de la caldera No. 3.
- Cerrar la caldera (registros hombres).
- Trasladar acido y potasa para detrás de las calderas.
- Garantizar todo esto esta semana, el jueves o viernes se da confirmación para ejecutar los trabajos próxima semana.
- Garantizar medios de protección (overoles contra ácido)



- Brigada de salvamento con ambulancia en el lugar.
- Reactivo para determinar la concentración de ácido.

### Operaciones:

- 1) Llenar la caldera de agua hasta cubrir el cañón central.
- 2) Vaciar acido en tanques que ellos tienen habilitado.
- 3) Comenzar a adicionar acido, esto genera gran espuma, por tanto, hacerlo muy lento para evitar derrames en la parte superior.
- 4) Una vez llena la caldera, circular y medir concentración.
- 5) Dejar 24 horas (hasta el otro día) y vaciar. Se propone adicionar potasa y circular para neutralizar lo que quede de ácido.
- 6) Enjuagar en dos ocasiones.
- 7) Llenar de agua y adicionar potasa, circular y dejarla un día.
- 8) Enjuagar dos ocasiones y queda lista para operar.

### 2.6 Datos para el cálculo de los parámetros del Generador de Vapor.

AIRE	
temperatura del aire al quemador; taf (°C)	35,000
entalpía del aire al quemador; kJ/kg	35,350
calor específico de aire ca; (kJ/kg. °C)	1,001
Volumen teórico de aire combustión Va; (m <sup>3</sup> /kg)	10,200
AGUA	
temperatura del agua de alimentar; taa (°C)	27,000
entalpía del agua de alimentar; iaa (kJ/kg)	113,049
flujo de agua de alimentar; Daa (kg/s)	1,806
entropía del agua de alimentar; Saa (kJ/kg. K)	2,062
VAPOR SATURADO	
presión del vapor saturado del GV; Pv (kPa)	800,000
entalpía del vapor saturado del GV; ivs (kJ/kg)	2731,432
entropía del vapor saturado del GV; Sv (kJ/kg. K)	6,980
flujo de vapor saturado del GV; Dvs (kg/s)	1,806
COMBUSTIBLE	
PETRÓLEO	
temperatura del combustible caliente tc; (°C)	70,000

presión de atomización del combustible $p_c$ ; (kPa)	250,000
flujo de combustible consumido $B$ ; (kg/s)	0,200
valor calórico bajo del combustible $v_{cb}$ ; (kJ/kg)	39480,000
Calor sensible $Q_{sen}$ ; (kJ/kg)	84,000
calor específico del petróleo $C_c$ ; (kJ/kg. °C)	1,200

**GAS NATURAL:**

temperatura del combustible entrada $t_c$ ; (°C)	30.000
presión de atomización del gas natural $p_c$ ; (kPa)	150.000
flujo de gas natural consumido $B$ ; (kg/s); (kg/h)	0.250
valor calórico bajo del gas natural $v_{cb}$ ; (kJ/kg)	28852.800
Calor sensible $Q_{sen}$ ; (kJ/kg)	0.000
densidad del gas natural $R_{gas}$ ; kg/m <sup>3</sup>	0.737
calor específico del gas natural $C_c$ ; (kJ/kg. °C)	2.200

**GASES COMBUSTIÓN**

contenido volumétrico de CO <sub>2</sub> en gases; (%)	12,000
contenido volumétrico de CO en gases; (%)	0,200
contenido volumétrico de O <sub>2</sub> en gases; (%)	5,000
temperatura de gases calientes de salida $T_g$ ; (°C)	200,000
coeficiente exceso de aire de combustión $a_{gs}$ ; adim	1,200
calor específico de los gases $c_p$ ; (kJ/m <sup>3</sup> . °C)	2,500
volumen normal de gases combustión $V_{gs}$ ; (m <sup>3</sup> /kg)	13,000
flujo de gases combustión $G_{gas}$ ; m <sup>3</sup> /s	0,118

**SUPERFICIE EXTERIOR DEL G. VAPOR**

superficie de la envoltura $F_{env}$ ; (m <sup>2</sup> )	8,000
superficie de las tapas frontal y trasera $F_{tap}$ ; (m <sup>2</sup> )	4,000
temperatura superficie de la envoltura $T_{env}$ ; (K)	313,000
temperatura de superficie de las tapas $T_{tap}$ ; (K)	333,000
temperatura media de paredes calientes $T_{pm}$ ; (K)	319,667
coeficiente de T. calor exterior $Alfa_{conv}$ ; (W/oC.m <sup>2</sup> )	8,379
superficie externa total $F_{tp}$ ; (m <sup>2</sup> )	12,000

Los datos mostrados aparecen en la segunda hoja del software creado, el cual consiste en hojas de cálculo de Excel las cuales tienen fórmulas insertadas para hallar los valores de

rendimiento energético y exergético del generador, Índices de desempeño energético, daño ambiental debido a la combustión y varios indicadores de prefactibilidad termoeconómica.

### **2.3 Metodologías de cálculo de la eficiencia de operación de la caldera.**

La determinación de la eficiencia de la caldera será posible calcular por dos métodos (método directo e indirecto) con la ayuda de las tablas de cálculo creadas en el Software Exel.

El rango de valores para  $\eta_b$  está entre 80 y 94 %, dependiendo del tipo de GV. Todos tienen un límite superior que sólo es posible alcanzarlo utilizando las tecnologías de máximo potencial energético para los GV; Estas son:

- Magnetizadores (tratamiento de agua)
- Emulsores (petróleos muy densos y el crudo cubano)
- Precalentadores de aire
- Atomizadores de bajo NOx y alta eficiencia.
- Turbulizadores en conductos de gases.
- Períodos de limpiezas por el lado de gases optimizado técnico económicamente.
- Lecho fluidizado, supercríticas, gasificación, recuperadoras de calor, etc.

#### **2.3.1 Método directo de cálculo de la Eficiencia bruta de operación del Generador de Vapor.**

Para calcular la eficiencia de la caldera mediante este método, se divide la producción total de energía de una caldera por entrada total de energía dada a la caldera multiplicada por cien.

$$E = \frac{Q(H-h)}{q*Gcv} * 100 \quad (2.1)$$

Donde,

Q: Cantidad de vapor generado; kg/h

H: Entalpía de vapor; kcal/kg

h: Entalpía del agua; kcal/kg

Gcv: valor calórico bruto del combustible.

Se calcula el rendimiento ( $\eta_b$ ) a partir de cuantificar los flujos y entalpías del agua, vapor, combustible, aire y gases.

$$B = [Qu/(Qd * \eta_b)] * 100\%; (Kg/s) \quad (2.2)$$

Donde:

B: consumo de combustible; kg/s

Qu: Calor útil; kJ/s.

$$Qu = Dvs (ivs - ia) \quad (2.3)$$

ivs, ia: entalpías del vapor y del agua de alimentar; kJ/kg

Qd: calor disponible; kJ/kg.

$$Qd = Qbc + Qpca + Qat + Qfc \quad (2.4)$$

Donde:

Qbc: valor calórico bajo del combustible; kJ/kg

Qpca: calor físico del aire en el precalentador de aire; kJ/kg

Qat: calor introducido por el vapor de atomización; kJ/kg

Qfc: Calor físico del combustible; kJ/kg.

### **2.3.2 Método indirecto de cálculo de la Eficiencia bruta de operación del Generador de Vapor.**

Se calcula el rendimiento ( $\eta_b$ ) a partir de cuantificar las pérdidas de calor.

$$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7); (\%) \quad (2.5)$$

Donde:

q2: Pérdidas de calor por los gases de escape.

q3: Pérdidas de calor por incombustión química del combustible.

q4: Pérdidas de calor por incombustión mecánica del combustible.

q5: Pérdidas de calor por enfriamiento exterior.

q6: Pérdidas de calor sensible con la ceniza.

q7: Pérdidas por purga. (En este caso la purga no es continua, por lo cual se omite de los cálculos).

Cada pérdida de calor se calcula por separado según:

$$q2 = \frac{Q2}{Qd} * 100 \quad (2.6)$$

$$Q2 = (igs - ags * iaf)(1 - q4/100); (kJ/kg) \quad (2.7)$$

Donde :

Igs; Entalpía de los gases de salida, (kJ/kg)

Ags; Coeficiente de exceso de aire en los gases de escape; adim

Iaf; Entalpía del aire frío que llega al generador, (kJ/kg).

$$q3 = \frac{Q3}{Qd} * 100 \quad (2.8)$$

$$Q3 = Vgs(30.2CO + 25.8H2 + 85.5CH4)(1 - q4/100); (kJ/kg) \quad (2.9)$$

Donde:

Vgs: Volumen de gases secos, (m<sup>3</sup>N/Kg.)

CO, H2, CH4: Contenido volumétrico de estos elementos en los gases secos, (%).

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_d} * 100 \quad (2.10)$$

Para combustibles sólido pulverizados  $q_4 = 0.5-5.0 \%$

Para combustibles líquidos y gaseosos  $q_4=0.5$  (despreciable).

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_d} * 100 \quad (2.11)$$

Esta pérdida depende de las dimensiones del generador de vapor, de la temperatura superficial y de la temperatura del aire exterior. Se propone ecuación para su cálculo obtenida de (Félix, 2019),

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_d} * 100 \quad (2.12)$$

Puede evaluarse a partir de la cantidad de ceniza que se extrae del horno, su calor específico y su temperatura, solamente se tiene en cuenta para combustibles sólidos. El método indirecto permite calcular el consumo de combustible una vez aplicado también el método directo de calcular el rendimiento del generador de vapor. Para realizar los cálculos descritos anteriormente se utilizaron recursos informáticos como son las hojas de cálculos Excel (EFIC-GV). Esto contribuyó a eliminar los errores que se originan de forma manual y realizar las operaciones con gran rapidez.

### 1.3.3 Cálculo del rendimiento exergético.

La evaluación con este método en las calderas permite valorar las irreversibilidades internas que tienen lugar en las mismas tanto en el proceso de combustión como en los procesos de transmisión de calor para la formación del vapor.

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_{ex} = \frac{((i_{vs}-i_{aa})-T_0*(S_{vs}-S_{aa}))*Q_v}{E_x} \quad (2.13)$$

$$E_x^{comm} = K * V_{cb} * Q_{comb} \quad (2.14)$$

Donde:

Ivs; Entalpía de vapor saturado; (kJ/kg)

Iaa; Entalpía del agua a alimentar; (kJ/kg)

T0; Temperatura inicial (K)

Svs; Entropía de vapor saturado; (kJ/kg)

Saa; Entropía del agua a alimentar; (kJ/kg)

Ex; Exergía del combustible; (adim)

K; Coeficiente equivalencia exergética; (adim) (0,95...1,05)

Vcb; Valor calórico del combustible; (kJ/kg)

Qcomb; Flujo de combustible; (kg/s)

Qv; Flujo de vapor;(kg/s).

## 2.4 Índices de Desempeño Energético para el Generador de Vapor.

Para el cálculo del índice de desempeño energético se propone relacionar los factores:

- Cantidad de petróleo crudo producido (toneladas).
- Cantidad de gas natural (m<sup>3</sup>) o de petróleo (kg) consumido.

Conociendo estos factores se plantea:

$$i_{DE} = \frac{C_c}{P_p} \quad (2.15)$$

Donde:

$i_{DE}$ : índice de desempeño energético

$C_c$ : Consumo de combustible; m<sup>3</sup> (gas natural), kg (petróleo)

$P_p$ : Petróleo producido(calentado); t.

Otro Índice de Desempeño Energético que se propone es la relación de:

Cantidad de petróleo crudo producido (toneladas).

Cantidad de vapor usado para calentamiento del petróleo de producción.

$$i_{DE} = \frac{Dvs}{P_p} \quad (2.16)$$

De esta forma se puede calcular los índices de desempeño energético del Generador de Vapor para el consumo de gas natural o petróleo (Crudo Nacional) y para el uso del vapor de agua.

## **2.5 Indicadores de prefactibilidad termoeconómica.**

### **2.5.1 Consumo total de combustible equivalente (Beq):**

$$\sum_{i=1}^n keq_i * B_i ; (kg/año) \quad (2.17)$$

Donde:

$B_i$ ; es el gasto o consumo anual de cada portador energético expresado en litros, kg, kWh según sea el caso

$keq_i$ ; es el factor de conversión en combustible equivalente de cada portador de energía respecto a la cantidad específica consumida del portador energético en cuestión.

### **2.5.2 Intensidad Energética.**

$$IE = \frac{Beq}{PM} ; (kg/cup) \quad (2.18)$$

Donde:

PM: Producción mercantil expresada en cup/año.



### 2.5.3 Productividad Termoeconómica:

$$P_{Te} = \frac{1}{IE * 0.042} - DAe; (cup/GJ \text{ año}) \quad (2.19)$$

Donde:

DAe; es la estimación económica de los gastos financieros para atenuar los daños por uso de combustible de origen fósil expresada en cup/año.

### 2.5.4 Eficiencia Termoeconómica.

$$Efic_{TE} = \frac{P_{Te}}{(P_{Te} + C_{Te} + DAe)} \quad (2.20)$$

Donde:

C<sub>Te</sub>: Costo Termoeconómico; cup/GJ. Año.

Debe notarse que para elevados valores de la  $Efic_{TE}$  cercanos a 100% indican la existencia de un proceso de producción o servicios que utiliza racionalmente la energía para su funcionamiento.

### 2.5.5 Costo Termoeconómico.

Determinación del costo termoeconómico de la energía consumida en el proceso de transformación de la energía **C<sub>Te</sub>** (cup/GJ. año) a partir de conocer Los costos de la energía consumida **C<sub>e</sub>** (cup/GJ. año), el costo anual de amortización de la tecnología de transformación y uso de la energía **C<sub>a</sub>** (cup/GJ. año), así como los costos anuales de operación y mantenimiento **C<sub>om</sub>** (cup/GJ. año), según la expresión siguiente:

$$C_{Te} = C_e + C_a + C_{om} \quad (2.21)$$

Si además se quiere conocer el costo exergoeconómico de la exergía útil obtenida C<sub>Tex</sub> (asignándole todos los costos exergéticos de entrada a costo exergético de salida útil) en el proceso de transformación de la energía, se plantea que:

$$C_{Tex} = \frac{C_{Te}}{\eta_{ex}} = \frac{C_{ex} + C_a + C_{com}}{\eta_{ex}} \quad (2.22)$$

Donde

$\eta_{ex}$  es el rendimiento exergético calculado a partir del balance energético y exergético de la instalación

Se considera que la cantidad de exergía de la energía consumida coincide con energía consumida (para el caso de energía eléctrica y combustibles orgánicos), por lo cual  $C_e = C_{ex}$ .

## 2.6 Impacto Ambiental.

La huella ecológica por actividad energética de la empresa a partir del consumo de energía de origen fósil, se considera, según el estudio referenciado (Vizcón, 2021) que por cada 2,5 toe se debe tener sembrado una hectárea de bosques que puedan absorber las emisiones de los contaminantes atmosféricos como el CO<sub>2</sub>, entonces:

$$Huella\ ecológica = \frac{toe}{2,5} \quad (2.23)$$

Donde:

Toe: Consumos de combustible; toneladas equivalentes.

Según criterio dado por (Veziroglu, 1998), para los petróleos se estima que el daño ambiental estimado económicamente es 12,05 \$/ (GJ. año)

$$Daño\ estimado = 12,05 * Beq * 0,042; (\$/año) \quad (2.24)$$

## 2.7 Conclusiones parciales del Capítulo.

- Se describió el proceso de generación de vapor en la Empresa, así como sus etapas y los equipos que intervienen.
- Se planteó la secuencia de operaciones de arranque y parada de la caldera.
- Se realizó una descripción del modelo de libro de registro de parámetros de operación e incidencias del funcionamiento y cómo debe llevarse a cabo la limpieza de la caldera.
- Se plantearon las metodologías de cálculo de la eficiencia de operación y la eficiencia exergética de la caldera.

- Se estableció el método de cálculo para los Índices de Desempeño Energético del Generador de Vapor.
- Se propusieron métodos de cálculo para Indicadores de prefactibilidad termoeconómica e Impacto Ambiental debido a la combustión.

## Capítulo 3 Análisis de los resultados.

En el Capítulo 3 “Análisis de los resultados” se muestra el funcionamiento del software para el cálculo de los parámetros del generador de vapor expuestos en el anterior capítulo, así como los resultados obtenidos a partir de datos recogidos antes de enviar la caldera para ser reparada y remodelada. Entre los parámetros calculados se encuentran algunos de gran interés para la sostenibilidad ambiental en la empresa.

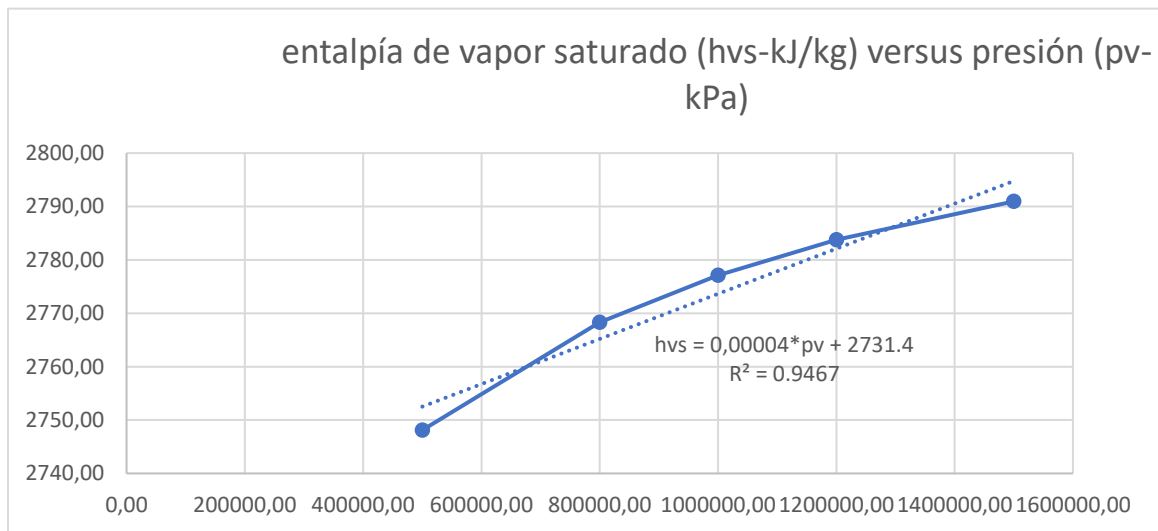
### 3.1 Utilización del software.

El Software cuenta con una primera hoja de presentación.

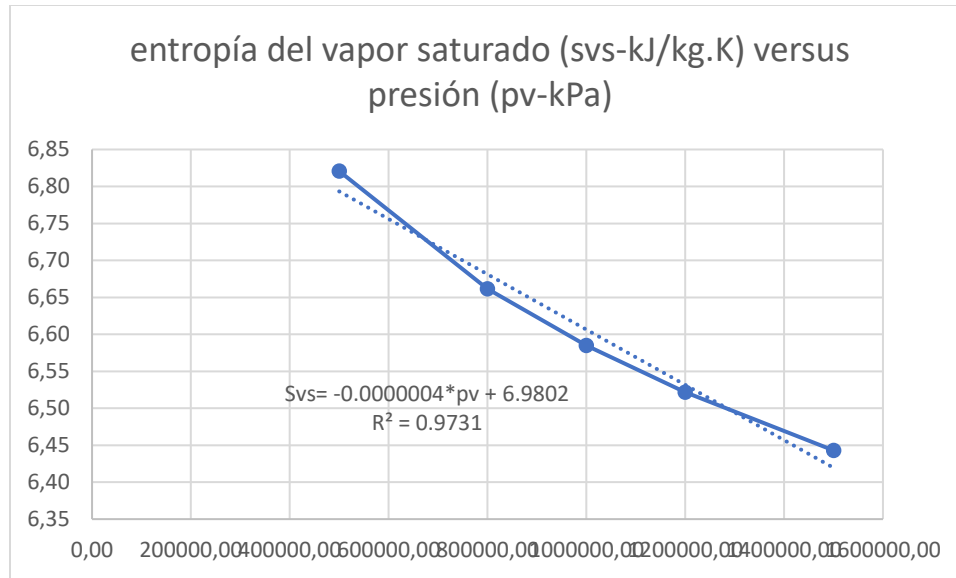
La segunda hoja está destinada a la entrada de datos de la caldera, y se calculan otros parámetros necesarios para su análisis como son los valores de entalpía y entropía.

En la siguiente hoja se muestran gráficos de propiedades obtenidas de corridas del software TKSolver:

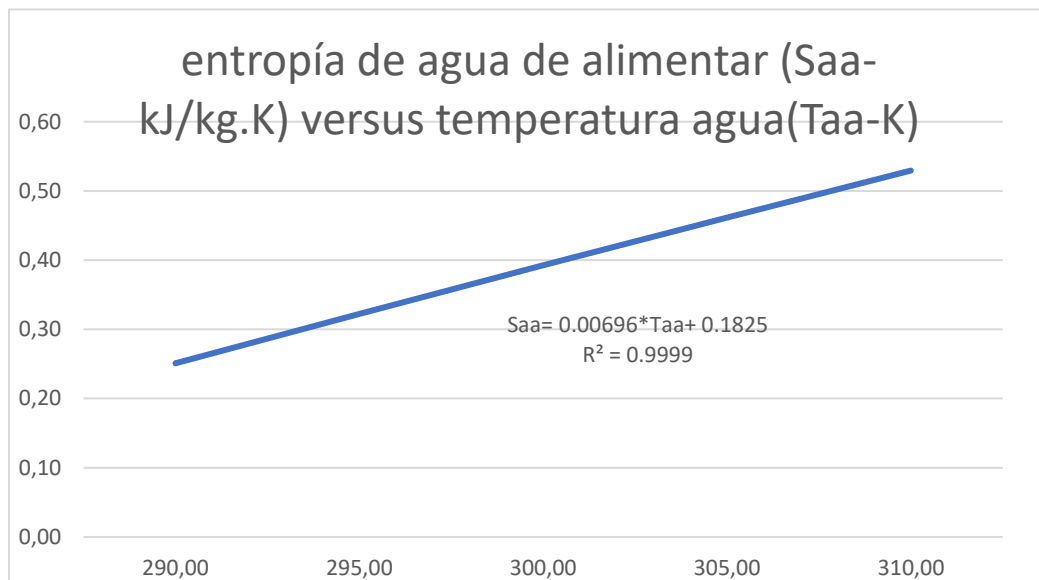
- Entalpía de vapor saturado (hvs-kJ/kg) versus presión (pv-kPa)



- Entropía del vapor saturado (svs-kJ/kg. K) versus presión (pv-kPa)



- Entropía de agua de alimentar (Saa-kJ/kg. K) versus temperatura agua (Taa-K)



### 3.2 Cálculo de rendimiento.

Para los cálculos de rendimiento energético y exergético del generador de vapor se hace uso del software y se utilizan datos de la caldera antes de ser enviada a reparar.

### 3.2.1 Cálculo de rendimiento por método directo.

En esta hoja se calculan los valores de rendimiento por método directo, donde se pueden registrar de forma diaria.

Fecha	Cantidad de vapor generado (Dvs; kg/s)	Entalpía del vapor (ivs; kJ/kg)	Entalpía del agua (iaa; kJ/kg)	Cantidad de combustible que entra (B; kg/s)	Valor calorífico bruto del combustible (Qbc; kJ/kg)	Producción específica de vapor (Dvs/B; kgvap/kgpet)	Rendimiento ( $\eta_{bd}$ )
01/01/2023	1.81	2731.43	113.05	0.25	28852.80	7.22	65.54
02/01/2023							
03/01/2023							
04/01/2023							
05/01/2023							

En la tabla se muestra el resultado obtenido al utilizar datos recopilados antes de parar la caldera para ser reparada. Donde se puede observar el bajo rendimiento al cual estaba operando, mucho menor que lo permitido por el fabricante según su eficiencia nominal (70%), lo que corrobora la necesidad de su reparación.

### 3.2.2 Calculo de rendimiento por método indirecto.

En esta hoja también se pueden registrar de forma diaria los valores de rendimiento.

Fechas	Pérdidas de calor por los gases de escape (q2; %)	Pérdidas de calor por incombustión química del combustible (q3; %)	Pérdidas de calor por incombustión mecánica del combustible (q4; %)	Pérdidas de calor por enfriamiento exterior (q5; %)	Rendimiento ( $\eta_{bi}$ )
01/01/2023	15.50	0.71	0.05	16.94	66.80
02/01/2023					
03/01/2023					
04/01/2023					
05/01/2023					

Se muestra el resultado obtenido de calcular el rendimiento energético por método indirecto, el cual corrobora la baja eficiencia de operación de la caldera.

### 3.2.3 Análisis de rendimiento.

En la hoja número 6 del software se analizan los valores de rendimiento obtenidos por ambos métodos de cálculo.

Fecha	Error absoluto entre métodos nbd y nbi; %	nb_nom de la Caldera	Diferencia entre nbd y nbi; %	Ahorro (+) o sobreconsumo (-); (kg/h) entre Nb_nom y Nbd
01/01/2023	1.92	70.00	1.26	-40.13
02/01/2023				
03/01/2023				
04/01/2023				
05/01/2023				

Se puede observar el sobreconsumo de gas combustible (40,13 kg/h) presente en la caldera debido a los bajos valores de eficiencia. También existe alguna diferencia entre los métodos de cálculo (1,92%), en el rango de lo permitido (0.5-2.5), existe un déficit de instrumentación necesaria para la medición de varios parámetros (ejemplo: no se posee flujómetro para vapor), lo que puede llevar a errores al calcular por ambos métodos directo e indirecto.

### 3.2.4 Rendimiento exergético.

Fecha	Entalpía de vapor saturado; (ivs; kJ/kg)	Entalpía del agua de alimentar; (iaa; kJ/kg)	Temperatura ambiente (To; K)	Entropía de vapor saturado; (Sv; kJ/kg)	Entropía del agua de alimentar; (Saa; kJ/kg)	Flujo de combustible; (B; kg/s)	Flujo de vapor; (Dvs; kg/s)	Rendimiento exergético (Nex; %)
01/01/2023	2731.43	113.049	303.00	6.98	1.07	0.25	1.805555	21.81

02/01/2023								
03/01/2023								
04/01/2023								
05/01/2023								

En el generador de vapor existe un rendimiento exergético muy bajo debido a los bajos parámetros de la caldera y el flujo calorífico en el vapor a baja presión y temperatura es de baja exergía.

### 3.3 Índice de Desempeño Energético.

Para el cálculo del índice de desempeño energético se introducen los datos solicitados en la tabla No. 8 del software, donde se calcula la cantidad de combustible empleado y la cantidad de vapor que se utiliza para producir una tonelada de petróleo.

Fecha	Consumo-gasto de combustible (Cc); m <sup>3</sup> gas/h	Petróleo caliente producido (Pp); m <sup>3</sup> /h	Producción de vapor (Dvs; kg/h)	Gasto de agua por reposición; m <sup>3</sup> /h	IDE Gasto de agua para producción de petróleo; m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> pet	IDE Gasto de vapor para calentar petróleo; kg. Vapor/m <sup>3</sup> pet	Índice de desempeño energético (IDE) m <sup>3</sup> gas/m <sup>3</sup> pet
01/01/2023	663,300	170,800	6500,000	14,583	0,085	38,056	3,883
02/01/2023							
03/01/2023							
04/01/2023							
05/01/2023							

Los valores calculados de los gastos de combustible gaseoso, el gasto de agua y del vapor a utilizar para la producción del petróleo caliente están por encima de los valores por normas de trabajo lo que refleja la baja eficiencia de la caldera.



### 3.4 Indicadores de Prefactibilidad Termoeconómica y Daño Ambiental.

Datos	Valores
Consumo anual de la caldera (Beq); kg/año	5400000
Producción mercantil (PM); cup/año	20970843.09
Daños por uso de Combustible de origen fósil (DAe); cup/ (GJ. año)	12
Costos de la energía consumida (Ce); cup/ (GJ. año)	25
Costo anual de amortización de la tecnología (Ca); cup/ (GJ. año)	15
Costos anuales de operación y mantenimiento (Com); cup/ (GJ. año)	0.45

Resultados	Valores
Intensidad Energética (IE); kg/cup	0.26
Productividad Termoeconómica (PTE); cup/ (GJ año)	92.46
Costo Termoeconómico (Cte); cup/ (GJ. año)	52.45
Eficiencia Termoeconómica (Efic <sub>TE</sub> )	58.93
La huella ecológica por actividad energética; ha	2160.00
Daño Estimado; \$/año	2721600

Los valores calculados de productividad y eficiencia termoeconómicas son bajos debido a la baja eficiencia energética y exergética del generador de vapor. Los resultados obtenidos reflejan el elevado nivel de contaminación ambiental que ocasiona la empresa debido al consumo de combustibles fósiles, el cual pudiera disminuirse con incrementar la eficiencia de operación de la caldera y con la utilización de fuentes de energía renovables.

### 3.5 Recomendaciones para el buen funcionamiento de la Caldera.

- Instalar flujómetro para medir la cantidad de vapor producida.
- Instalar válvulas de acción rápida en sustitución de las existentes, para realizar las extracciones de fondo durante la operación de la caldera pues las válvulas existentes no son las más idóneas para esta operación

- Realizar una limpieza química a la caldera durante su mantenimiento, con el objetivo de eliminar las incrustaciones y aumentar la eficiencia del generador de vapor.
- Mantener un control sistemático de los resultados de los análisis de laboratorio referentes a la calidad del agua de alimentar y al agua en el interior de la caldera (tratamiento externo e interno) para lograr disminuir el volumen de incrustaciones.
- Garantizar el ciclo necesario de extracciones de fondo según análisis del agua de laboratorio, manteniendo 3500 ppm como máximo de sólidos totales.

### **3.6 Conclusiones Parciales del Capítulo.**

- Se explicó el funcionamiento del software.
- Se calculan los parámetros que permiten diagnosticar el trabajo eficiente del generador de vapor y los que caracterizan la economía de su funcionamiento.
- Se realizó una corrida del software con datos de la caldera antes de ser detenido su uso para la reparación.

## Conclusiones

- 1) Se realizó un estudio de la documentación existente de la caldera donde se observó la falta de documentación necesaria. Se creó de forma satisfactoria el software para la evaluación del funcionamiento del Generador de Vapor. Se calculó mediante el software realizado los parámetros de la caldera corroborando la necesidad de reparación de la misma.
- 2) Con la ejecución del software se pudo:
  - Calcular el bajo rendimiento al cual estaba operando, mucho menor que lo permitido por el fabricante según su eficiencia nominal (70%), lo que corrobora la necesidad de su reparación.
  - Se puede observar el sobreconsumo de gas combustible (40,13 kg/h) presente en la caldera debido a los bajos valores de eficiencia. También existe alguna diferencia entre los métodos de cálculo (1,92%), en el rango de lo permitido (0.5-2.5), existe un déficit de instrumentación necesaria para la medición de varios parámetros (ejemplo: no se posee flujómetro para vapor), lo que puede llevar a errores al calcular por ambos métodos directo e indirecto.
  - En el generador de vapor existe un rendimiento exergético muy bajo debido a los bajos parámetros de la caldera y el flujo calorífico en el vapor a baja presión y temperatura es de baja exergía.
  - Los valores calculados de los gastos de combustible gaseoso y del vapor a utilizar para la producción del petróleo caliente están por encima de los valores por normas de trabajo lo que refleja la baja eficiencia de la caldera.
  - Los valores calculados de productividad y eficiencia termoeconómicas son bajos debido a la baja eficiencia energética y exergética del generador de vapor. Los resultados obtenidos reflejan el elevado nivel de contaminación ambiental que ocasiona la empresa debido al consumo de combustibles fósiles, el cual pudiera disminuirse con incrementar la eficiencia de operación de la caldera y con la utilización de fuentes de energía renovables.

## **Recomendaciones**

- Es de gran importancia la utilización de este software para diagnosticar y llevar el control frecuente de la eficiencia de la caldera y así se tiene una idea de cómo está trabajando la misma, y cuándo sería necesario hacerle el mantenimiento que esto ayuda a su conservación y trabajo más eficiente.

## Referencias Bibliográficas

- A, B., G, T., & M., M. (1996). *Thermal design and optimization*. New York: Jhon Wiley & Sons, inc.
- Abas N., K. A. (2015). *Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies*.
- Arias, J. M. (2006). *Gas natural licuado. Tecnología y mercado*. UEB Gas licuado de Petróleo «CUPET», La Habana, Cuba.
- Asdrubali F, B. G. (2015). Comparative life Cycle assessment of an air-cooled condenser system and Conventional condensers.
- Bahamondes, P. A. (2006). *Capacitación de trabajadores*. Obtenido de Descripción de calderas y generadores de vapor: [http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion ...](http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion...)
- Camaraza, M. Y. (2019). *Tesis predefensa doctoral: Métodos para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor en aerocondensadores que operan en centrales eléctricas de biomasa*. Villaclara, Cuba: UCLV.
- Campos, G. &. (2008). *La eficiencia energética en la gestión empresarial*. Cienfuegos. Cuba.
- Celestino, U. D. (2006). *Influencia de las calderas sobre el Medio Ambiente*. Ciencia en su PC, núm. 3, Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba, Santiago de Cuba, Cuba.
- Cengel, C. T. (2017). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. USA: McGraw-Hill Education, Edic. 5ta. .
- Cengel, Y. A. (2014). *Termodinámica* (octava edición ed.). México, México: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cusme, G. &. (2014). *“MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABI, Ecuador.
- E.P.E.P. Centro. (2000). *Reglamento Tecnológico de Calderas y Planta de Agua de la Planta de Procesamiento de Crudos*.
- Félix, C. V. (2019). *Trabajo de Diploma: Diagnostico termodinámico para el desempeño energético del generador de vapor de la universidad de matanzas*. UNIVERSIDAD DE MATANZAS.
- García Morales, O. F. (2007). *Índices y aplicación de medidas para la Gestión Energética en la Universidad de Matanzas, Universidad de Matanzas*. Universidad de Matanzas.
- Gonzales Sánchez, M. (2019). *Trabajo de diploma: Análisis de los indicadores de desempeño energético según la norma ISO 50001*. Universidad de Matanzas.
- Lapido Rodríguez, M. J. (2015). Funcionamiento y pérdidas en calderas pirotubulares "Estudio de casos", Cienfuegos. *Universo sur*.
- Moran, T. B. (2018). *Handbook of Thermal Engineering*. USA: CRC Press. 2da. Edic. .
- Normalización, O. N. (2011). *Sistemas de gestión de la energía-Requisitos con orientación*. Oficina nacional de normalización de Cuba.
- Ocañas, G. V. (2006). *Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético*. Santa Clara, Cuba: Universidad Central de Villaclara "Marta Abreu".

- Oficina nacional de estadísticas de Cuba. (31 de 12 de 2016). *anuario estadístico cubano*. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de [www.one.cu](http://www.one.cu)
- Osejo Martínez, D. E. (2017). (*Bachelor's tesis*): *Diseño de una caldera de generación de vapor piro tubular de 10 BPH expandible a 25 BPH mediante módulos*. Fundación Universidad de América.
- Powers, J. M. (2017). *Lecture Notes on Thermodynamics*. Francia: University of Notre Dame.
- Rubio Gonzales, Á. M. (2015). *Generadores de Vapor. Funcionamiento y explotación*. Santa Clara: Editorial Feijoo.
- Rubio, G. A. (2007). *Combustión y Generadores de Vapor*. Cienfuegos, Cuba: UNIVERSOSUR.
- Söshret Y, S. H. (2017). Sustainability Assessment and improvement performance of a air-cooled condenser in power plant: Exergy-Based Method, in Energy solution to combat global warming. *pp.1451*.
- Standards, C. N. B. (2011). Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso. *Normas ISO 50001*. (ISO 50001:2011, IDT).
- Tanquero Díaz, N. (2002). *Curso de Generadores de Vapor*. Puerto Ordaz, Venezuela.
- Veziroglu, T. (1998). *Environmental damage for energy use*. Coral Gables, FL, 1998.: Proceedings of the 12th WHEC, International Association for Hydrogen Energy.
- Vizcón Toledo, R., & otros. (2022). Nexus among Thermoeconomic productivity and environmental sustainability. Moscú, Rusia: ISBN 978-5-94721-157-3 © Авторы, 2022 © Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2022.
- Vizcón, R. (2021). *Eficiencia y productividad termoeconómicas como nuevos índices de sostenibilidad energética y ambiental*. Matanzas: monografías de la UM. ISBN-978 - 959 - 16 - 4681 - 1.

## Anexos

### Anexo 1 Casa de calderas.



### Anexo 2 Calderas de la instalación.

