



Universidad de Matanzas  
Facultad de Ciencias Técnicas



# ANÁLISIS EXERGÉTICO Y EVALUACIÓN TERMOECONÓMICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA "ANTONIO GUITERAS"

Tesis Presentada como Requisito Parcial  
para la Obtención del Título de Máster  
en Tecnología Energética

Autor: Ing. Mec. Luis Gabriel Yiró Hernández

Matanzas, 2018



Universidad de Matanzas  
Facultad de Ciencias Técnicas



# ANÁLISIS EXERGÉTICO Y EVALUACIÓN TERMOECONÓMICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA "ANTONIO GUITERAS"

Tesis Presentada como Requisito Parcial  
para la Obtención del Título de Máster  
en Tecnología Energética

Autor: Ing. Mec. Luis Gabriel Yiró Hernández

Tutor: Dr. C. Roberto Vizcón Toledo.

Matanzas, 2018

## **Declaración de Autoridad**

Yo Luis Gabriel Yiró Hernández declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada Análisis Exergoeconómico y Evaluación Termoeconómica del Sistema de Generación de Vapor de la Central Termoeléctrica "Antonio Guiteras" de la Provincia de Matanzas, y en virtud de tal cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia Creativa de tipo reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que tenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 30 de Marzo de 2018

Luis Gabriel Yiró Hernández



## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento al claustro de profesores de la Maestría Tecnología Energética de la Universidad de Matanzas y en especial a mi tutor, Dr. Roberto Vizcón Toledo por los conocimientos brindados para la realización del presente trabajo.

A los especialistas de la Central Térmica Antonio Guiteras, MSc. Nelson López Ripoll, Román Pérez, a los ingenieros Dagoberto Martínez, Raimel Rodríguez, Hortensia Ibáñez, Rene Horta, Yúnior de la Paz, al Licenciado Rolando Naranjo y al Instructor de Operaciones Lázaro García por la ayuda que me brindaron en la adquisición de datos e informaciones, sin el cual no hubiese podido realizar esta tarea.

A mi familia y amigos en general

A Todos, Muchas Gracias.

## RESUMEN

El presente trabajo justifica la necesidad de la implantación de técnicas más avanzadas con el propósito de su aplicación como primer paso de pre-evaluación de forma comparativa en la eficiencia del Generador de Vapor (caldera) de la Central Térmica "Antonio Guiteras" con el método tradicional (ASME PTC.4.1), para así obtener el comportamiento del sistema, logrando caracterizar y valorar las incidencias de los equipos fundamentales en el rendimiento del generador de vapor sobre la base de la utilidad y destrucción de la exergía, donde la aplicación de la metodología sirve de guía al Departamento de Planificación e Inspección de los Mantenimientos como procedimiento en la valorización del comportamiento de los equipos que conforman el generador de vapor desde el punto de vista del análisis exergético y exergoeconómico, logrando la realización de una planificación más centrada en aquellos equipos o subsistemas que presentan mayor destrucción de exergía y elevados costos exergéticos, con la finalidad de alcanzar un mayor ahorro energético al poder interactuar desde un punto de vista de mejoras, rediseños o sustitución del equipo, componente o proceso, mediante el logro de la disminución de la destrucción de exergía, referidas a los parámetros de diseños.

**Palabras claves:** energía, exergía, eficiencia exergética y destrucción de exergía.

## **ABSTRACT**

This paper justifies the need for the implantation of more advanced techniques for the purpose of its application as a first step of comparative pre-evaluation in the efficiency of the steam generator (boiler) of the thermal power plant " Antonio Guiteras " with the traditional method (ASME PTC.4.1), in order to obtain the behavior of the system, achieving to characterize and to evaluate the incidences of the fundamental equipment in the performance of the steam generator on the basis of the utility and destruction of the exergy, where The application of the methodology serves as a guide to the Department of Planning and Inspection of the maintenances as a procedure in the valorization of the behaviour of the equipment that make up the steam generator from the point of view of the exergetic analysis and Exergoeconómico achieving a more focused planning on those teams or subsystems that have greater destruction of exergy and high exergétic costs, in order to achieve greater energy savings by being able to interact from A point of view of improvements, redesigns or substitution of the equipment, component or process, by means of the achievement of the decrease of the exergy destruction, referring to the parameters of designs.

Key words: energy, exergy, exergetic efficiency and exergy destruction

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo 1 Revisión Bibliográfica .....	4
1.1 Antecedentes Termodinámico y Termoeconómico .....	4
1.2 Estado del Arte Exergético y Termoeconómico .....	5
1.3 Fundamentos Exergéticos .....	10
1.4 Fundamentos Termoeconómicos .....	12
1.4.1 Análisis de Costo Exergético .....	14
1.4.2 Condiciones que deben Satisfacer las Relaciones (Fuel -Producto).....	15
1.4.3 Costo Exergoeconómico Fuel (recurso) y Producto .....	15
1.4.4 Factor Exergoeconómico .....	17
1.5 Calidad del Aire .....	18
1.5.1 Técnicas para Estimación de Contaminantes.....	20
1.5.2 Estimación de Volumen de gases secos a partir del análisis del combustible..	20
1.5.3 Técnicas empleadas para la Estimación de Contaminantes .....	20
Capítulo 2 Materiales y Métodos.....	21
2.2.1 Materiales para el desarrollo de la Metodología .....	21
2.2.2 Metodología Empleada .....	21
2.3 Desarrollo de la Metodología.....	23
2.3.1 Balance Estequiométrico .....	23
2.3.2 Resultado del Balance de la Combustión.....	27
2.3.3 Metodología y Cálculo de las Estimaciones Contaminantes .....	29
2.4 Balance Energético -Exergético.....	33
2.4.1 Definición de Volumen de Control y Estructura Funcional del Sistema .....	33
2.4.2 Propiedades Termodinámicas Ambientales y de Referencias .....	34
2.4.3 Sistemas que intervienen en el Proceso .....	36
2.4.4 Balance Energético Exergético de Cámara de Combustión .....	39
2.4.5 Balance Energético Exergético del Horno .....	41
2.4.6 Balance Energético Exergético de Sobrecalentadores.....	43
2.4.7 Balance Energético Exergético de Economizador .....	46
2.4.8 Balance Energético Exergético de Recalentadores.....	48
2.4.9 Resultado del Balance Energético - Exergético.....	50
2.5 Análisis Termoeconómico del Sistema .....	53
2.5.1 Coste Exergético del Fuel y Producto.....	54
2.5.2 Coste Exergoeconómico Unitario del Fuel y Producto.....	56
2.5.3 Coste Exergoeconómico del Fuel y Producto .....	56
2.5.4 Factor Exergoeconómico de los Sistemas .....	57
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	60
3.1 Representación Gráfica.....	60
Conclusiones .....	64
Recomendaciones .....	65
Referencias Bibliográficas .....	66
Anexos 1.1 Índice de Tablas.....	70
Anexos 1.2 Índice de Figuras y Gráficas .....	71
Anexos 1.3 Polinomios para los calores específicos de las sustancias .....	72

## INTRODUCCIÓN

En la central termoeléctrica la energía química del combustible se transforma en energía calorífica en los Generadores de Vapor. (GV).

El monitoreo y mejora de la eficiencia de los generadores de vapor representa no solo ahorro de energía, sino también un beneficio desde el punto de vista ecológico ya que las emisiones de gases de la combustión dañinos al ambiente son proporcionales al consumo de combustible.

En el generador de vapor de la central termoeléctrica Antonio Guiteras de Matanzas se consumen anualmente alrededor de 500 000 toneladas de petróleo, por lo que las posibles desviaciones de la eficiencia pueden provocar considerables pérdidas de combustibles y un alto impacto ambiental.

Dada la aceptación a escala internacional del código de pruebas energéticas de la American Society of Mechanical Engineers (ASME PTC.4.1); este se utiliza como referencia para la metodología de pérdidas (indirecto), y el de entrada y salida (directo), donde el alcance y la metodología de realización de estas pruebas tienen actualmente las siguientes limitaciones:

- Las pruebas no reflejan las pérdidas de la capacidad para realizar trabajo de la energía consumida por el equipo. Solo se realizan análisis basados en la primera Ley de la Termodinámica.

Un ejemplo es que los análisis actuales no reflejan en toda su magnitud las pérdidas energéticas cuando el generador de vapor trabaja con presión de vapor inferior a la nominal.

- No se calculan indicadores que reflejen el impacto económico y medio ambiental de las desviaciones de las eficiencias del equipo.

- La aplicación de la metodología se realiza por una empresa que brinda servicios a la central termoeléctrica ya que no existe metodología propia.

El análisis de esta situación polémica permite identificar la necesidad de realizar un estudio para elaborar y aplicar una metodología de monitoreo del estado termodinámico y el impacto ambiental del generador de vapor que cuantifique los costos económicos y los impactos ambientales de las desviaciones de los indicadores de eficiencia, de manera que sirva para establecer requerimientos de mantenimientos, ajustes y valoración de comportamiento en la operación del equipo.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente se propone con este estudio dar la solución siguiente:

### **Problema Científico de la Investigación.**

¿Cómo determinar cualitativa y cuantitativamente las pérdidas energéticas y exergéticas en el generador de vapor de la central termoeléctrica Antonio Guiteras y su impacto económico y medioambiental?

### **Hipótesis.**

Aplicar una Metodología que permita cuantificar la eficiencia termodinámica y termoeconómica en los componentes básicos del generador de vapor (caldera), basados en la utilidad de la energía, estimando las emisiones contaminantes originadas en el proceso productivo de la central térmica Antonio Guiteras.

### **Objetivo General.**

- 1) Elaborar y aplicar una metodología para el análisis termoeconómico y el impacto ambiental del generador de vapor de la central termoeléctrica Antonio Guiteras.

### **Objetivos Específicos**

- 1) Revisar la bibliografía relacionada con la temática de la investigación.
- 2) Demostrar la influencia del comportamiento exergético de los equipos fundamentales de la caldera en el rendimiento del Generador de Vapor.
- 3) Definir diagrama de Volumen de Control para el caso de estudio.
- 4) Definir la Estructura Funcional del sistema a análisis
- 5) Aplicar la metodología de análisis termoeconómico y medio ambiental.
- 6) Aplicar y evaluar el resultado de la investigación.

### **CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CTE "ANTONIO GUITERAS."**

Caldera presurizada de circulación natural, dilatación vertical hacia abajo.

Flujo total de vapor 1110T/h - Flujo nominal de vapor 974 T/h

Presión y Temperatura nominal de vapor sobrecalentado 166 bar y 540 °C

Total de quemadores 16 repartidos en 4 pisos

Etapas de sobrecalentamiento: 4 - Etapas de recalentamiento: 2

Los intercambiadores atendiendo a la incidencia de la llama se encuentran ubicados en la parte radiante: SBT, SMT, SAT y RAT, en la parte convertiva RBT y ECO.

## **CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

El uso adecuado de la energía como recurso plantea la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar no solo la eficiencia sino profundizar en lo que ocurre con la utilidad de esa energía en el proceso al cuál se involucra, facilitando la gestión de dicho recurso en aras de evaluar, optimizar e incluso rediseñar procesos.

En la actualidad sobre esta temática se han aplicados estudios con base de análisis energéticos en procesos industriales, donde industrias como la petroquímica, química, acero, papel, procesos de cogeneración de energía, entre otras, han desarrollado un balance más centralizado en la evaluación de la verdadera utilidad de esa energía; En países como Japón, Suecia y Turquía los procesos de conversión de energías (Industriales y de recursos materiales) son expresados en términos de energías.

### **1.1 Antecedentes Termodinámico y Termoeconómico**

[Lozano 1997] La preocupación creciente por el ahorro de energía ha fomentado el desarrollo de técnicas de análisis basada en el Segundo Principio, y en particular de exergía.

[Tsatsaronis et al 2002] En el caso de las centrales termoeléctricas el mal funcionamiento de ciertos equipos como la caldera comienza a tener un gran impacto económico incluso para desviaciones de su comportamiento con respecto al esperado por diseño [Rodríguez et al .2002]; indicando algunos autores que para evaluar el desempeño termodinámico y efectividad de los sistemas térmicos, así como para estimar el potencial de mejoras siempre es útil conocer la parte de la destrucción que se puede evitar y el costo de inversión evitable para compresores, turbinas, intercambiadores de calor y cámara de combustión.

Lozano [2002] El diagnóstico de los sistemas energéticos forma parte de la estrategia de mantenimiento correctivo, es por ello que deben buscarse unos resultados de diagnósticos que tengan la máxima certidumbre compatible con la cantidad y calidad de medidas disponibles, definiendo la importancia de como el diagnóstico termoeconómico ayuda a

detectar las anomalías de funcionamiento que disminuye la eficiencia de una central termoeléctrica, a identificar los equipos en que se producen y a estimar su impacto adicional de combustible. [Remiro et al 2007] Donde la combinación de la exergía y la economía aportan un enfoque termoeconómico, centrado en estudiar los mecanismos por medios de los cuales se degrada la calidad de la energía.

[Sanjay 2012] El consumo de energía es uno de los indicadores más importantes que muestra el desarrollo de los países y las normas de convivencias de las comunidades, donde el valor definido de energía solo se puede obtener por un valor cualitativo de exergía de su conversión, transportación y distribución.

[More 2014] Se usa la energía y el análisis exergético para analizar el desempeño del sistema, lo más temprano posible, donde la mayoría de las plantas térmicas se diseñan basado en principio de la 1era ley de la termodinámica, la cual no puede justificar, la diferencia entre la cantidad y calidad de la energía.

[Verman. 2014] La exergía se define como el trabajo máximo disponible que se puede obtener de un sistema que interactúa con su medio ambiente hasta llegar a su estado de equilibrio con el mismo.

En la actualidad se han realizados un gran número de estudio e investigaciones que definen la importancia de la implantación del análisis termodinámico en la valoración y comportamiento de los sistemas energéticos, donde se pueden citar trabajos y publicaciones que demuestran el desarrollo que va tomando esta infraestructura.

## **1.2 Estado del Arte: Análisis Exergético y Exergoeconómico.**

[Kenya 2005] Publica un artículo basado en un estudio de una planta térmica en Kenya usando el método exergético, donde el objetivo del análisis era determinar la eficacia de la planta y localizar con precisión la situación y cantidades de pérdidas exergéticas.

[Moreno 2007] Ejecuta un Modelo que permite realizar la simulación de la central en distintas condiciones y consultar el estado de cada una de las operaciones de sus variables desde valores termodinámicos y el costo de cada uno de sus flujos hasta el costo de

generación total de la planta, logrando realizar un análisis de tipo paramétrico y aplicación práctica para la toma de decisiones de operación, mantenimiento y optimización.

[Carrillo 2007] Presenta un artículo que propone una metodología para realizar auditorías exergéticas como soporte a un plan de uso racional y eficiente de la energía.

[Salazar 2009] Realiza un análisis exergético a la central termoeléctrica de Ciudad Lemo, obteniendo los modelo exergéticos de los procesos termodinámicos que se efectúan en la termoeléctrica, elaborando un programa computacional que le permite realizar un análisis paramétrico considerando las condiciones de operaciones reales.

[Angélica 2011] Realiza una Evaluación del Proceso de Producción del Bioetanol de Segunda Generación mediante el Análisis Exergético.

Sanjay [2012] Mediante el análisis del método exergético de una planta térmica de carbón de 125 MW en la India, expone como la demanda de la energía ha hecho de las plantas térmicas un interés científico, donde la mayoría de las plantas térmicas están diseñadas solo bajo el criterio basado en la 1ra Ley de la Termodinámica, y las pérdidas de la energía realmente útil no puede ser justificada, ya que la misma no diferencia entre la cantidad y calidad de la energía.

[Naik at al 2012] El análisis de exergía proporciona un medio para evaluar la degradación de la energía durante un proceso, de generación de entropía, ofertando un acercamiento para la mejora del análisis de la planta térmica. Donde en el estudio realizado demuestra como la caldera presenta el más alto nivel de destrucción.

[Mechi 2012] Publica un artículo, que refleja el efecto de la temperatura ambiente para la eficiencia de una planta de energía, basado en el analice y concepto de exergía, donde se calcula toda las irreversibilidades del sistema, demostrando como el aumento en la temperatura ambiente es un factor importante para la disminución de la eficiencia de la Planta.

[Kulkarni 2013] ISSN: 2321-1156, Publica un artículo donde se realiza un estudio de energía y exergía de una planta térmica de carbón, con el objetivo de valorar el verdadero comportamiento de la misma.

[Gulhane Sarang 2013] Publica un artículo sobre el estudio exegético de la utilización eficiente de la energía en una caldera de cogeneración.

[Geete at al 2014] Realiza el estudio de la exergía de los diferentes componentes de una planta térmica de 120 MW

[Shafiq 2015] Publica un estudio del análisis del comportamiento del horno de una caldera de gas natural, mediante el análisis termodinámico.

[Monte 2009] Publica un libro donde recoge aspectos sobre la Termoeconomía y la Optimización Energética.

[Torres.at.al 2011] Realiza un estudio exergoeconómico para la evaluación de una alternativa técnica de cambio a una planta que produce y suministra vapor y energía eléctrica a un grupo de fábricas, con el objetivo de tener un uso eficiente de la energía, aplicando la cogeneración con ciclo combinado.

[Anozie 2012] Realiza un estudio termodinámico para conocer la influencia que presenta la caldera en la eficiencia de la unidad, determinando la proporción óptima de la relación aire – combustible, así como su temperatura de combustión.

[Xiong 2012] Define el planteamiento de la combinación de la termoeconomía combinando al concepto de costo económico y el concepto exergía en el campo de la termodinámica, proporcionando posibilidades de perfeccionamiento en el complejo Energía – Generador de los sistemas para lograr un equilibrio mejor entre la eficacia termodinámica y el costo económico en la optimización del funcionamiento de una planta de 300MW en Yiyang (Provincia de Hunan; China)

[Ahmade & Diner 2013] Realizan el estudio termodinámico y termoeconómico de un ciclo combinado de una planta térmica, para relevar el verdadero comportamiento y

calidad de la exergía del sistema, cuantificando las pérdidas y el costo que las mismas representan.

[Taghavi.at .al 2013] La Termoeconomía es la combinación del análisis exergético y la economía; Donde mediante el análisis energético y exergético se establecen las ecuaciones de conservación de masa y de energía que va a regir al sistema evaluado, aportando datos suficientes para un análisis más riguroso, donde después de estimar la destrucción de exergía, es importante saber el costo de las pérdidas

[Chao 2014] Realiza la evaluación de un diseño de 5 tipos de sistemas de energías geotérmicas, teniendo en cuenta el análisis termodinámico y termoeconómico para la optimización, determinando los datos básicos para las plantas, para el desarrollo futuro en Sichuan en el área geotérmica

[Hurtado 2014] Publica un artículo donde recoge la Valoración Exergética y Termodinámica de los Sistemas de Vapor, como una herramienta informática aplicada en el marco de la gestión energética.

[Brown 2015] Realiza un estudio de tesis basado en el Análisis de Energía y Exergoeconómico de los Componentes de una Planta Térmica de Ciclo Combinado, determinando las irreversibilidades y la destrucción de exergía, identificando el factor exergoeconómico para evaluar las posibles mejoras del componente que interviene en el sistema del ciclo combinado.

[Larrotta 2015] Realiza un trabajo de investigación, donde presenta en su artículo una breve descripción del término termoeconomía con el propósito de justificar su aplicación en los sectores industriales colombianos a partir de la formación académica en el área en concordancia con la política energética del estado.

[Oyedepo 2015] Realiza un estudio sobre una base termoeconómica y termo ambiental a una turbina de gas en Nigeria, donde con el empleo de la 1ra y 2da ley de la termodinámica, se obtiene los datos necesarios para la determinación de la destrucción de la exergía y eficacia de la exergía de cada componente, donde los resultados del estudio mostraron que la cámara de combustión es la de mayor destrucción de exergía,

comparado con otros componentes del sistemas. Demostrando en el análisis termoeconómico que el costo de exergía es alto en la cámara de combustión y cómo se comporta las emisiones del CO<sub>2</sub> en el proceso.

[Rostamzadeh 2017] Presenta un estudio del análisis teórico de un nuevo ciclo combinado de Refrigeración y Calefacción para una integración de un ciclo Rankine (ORC), un ciclo de refrigeración de eyector (ERC), y uno de bomba de calor (HPC), para elevar el rendimiento simultáneo de los 3 ciclos, donde se hace uso de las 1 y 2 Ley de la termodinámica.

[Hajabdollani 2017] Realiza un estudio termodinámico y termoeconómico con el objetivo de optimizar las variables en el comportamiento de una turbina de gas, para de este modo aumentar la eficiencia y minimizar la proporción del costo total del sistema, incluyendo el costo de las inversiones, costo de operación, y los costos de las altas multas por el impacto ambiental.

[Yousef 2017] Publica un artículo del estudio del comportamiento de la energía en las edificaciones modernas de hoy en día, lo cual involucra edificaciones con equipamientos eficaces. En el mismo presenta un estudio de un sistema híbrido para refrescar y calentar el ambiente empleando para ello una pequeña caldera de gas; el estudio es realizado con base termoeconómica en un edificio residencial aplicando un acercamiento de probabilidad para evaluar la viabilidad económica del mismo comparado con cuatro alternativas, donde además se estudió el efecto y comportamiento de las emisiones de carbono al emplear el gas como combustible.

### 1.3 Fundamentos Exergéticos.

[Babu.2011; Hitendra; Mitra.2015] Plantearon que para los efectos de realización de los análisis de los dispositivos térmicos, se tiene como primera medida el balance basado en la 1ra ley de la termodinámica la cual trata sobre la conservación de la energía sosteniendo que la energía nunca desaparece, esta ley sirve meramente como herramienta para contabilizar la energía durante el proceso, y la misma no ofrece una panorámica del lugar exacto donde ocurre las pérdidas.

Por lo que la segunda ley de termodinámica sostiene que la energía calórica no puede ser completamente aprovechada mientras interactúe con un sistema atmosférico. Es por ello, que se introduce una nueva magnitud energética, llamada exergía para cuantificar cuanto trabajo se puede aprovechar de una determinada sustancia o flujo de energía con respecto al ambiente natural.

[Kumar; Hasti. 2013; Nuñez. 2016] La exergía (máximo trabajo disponible) se representa como la combinación lineal del balance de energía y entropía; expresada mediante la siguiente ecuación.

$$\psi_{\max} = m_i * [(h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o)]; kW \quad (1.1)$$

donde:

$\Psi_{\max}$  [kW] ; representa el flujo de exergía ,  $h_i$  [ kJ / kg ] y  $S_i$  [ kJ/kg K]; representan la entalpía y entropía del flujo analizado, siendo  $T_o$  [Pa],  $h_o$  [kJ/kg],  $S_o$  [kJ/kg K]; la temperatura, la entalpía y la entropía del ambiente de referencia o punto muerto;  $m_i$  = masa del flujo o de corriente en [ kg/s ], y la exergía física ( $\beta$ ) representada por la ecuación (1.2), al ser llevado los fluidos al estado ambiente; siendo esta empleada para la obtención de la exergía en los flujos de agua – vapor. Gulhane [2013; Sanz. 2014]

$$\beta = (h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o); kJ / kg \quad (1.2)$$

Para un gas perfecto la ecuación (1.2) puede ser representada en función de la temperatura, tomando la siguiente expresión.

$$(h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o) = Cp * (T_i - T_o) - T_o * (s_i - s_o) \quad (1.3)$$

donde:

$$(s_i - s_o) = [cp * Ln(T_i / T_o) - R * Ln(P_i / P_o)] \quad (1.4)$$

siendo la exergía física para un gas ideal. Rojas [2007; Querol.2013; Mitra.2015]

$$\beta = Cp * [(T_i - T_o) - T_o * Ln(T_i / T_o)] + R * Ln(P_i / P_o) \quad (1.5)$$

obteniendo de forma general la exergía máxima para ambos flujos mediante la expresión:

$$\psi = \beta_i * m_i \quad (1.6)$$

definiendo la eficiencia exergética y la destrucción de exergía al valorar las corrientes del proceso en recursos y productos; (entradas (F) y salidas (P) de la forma siguiente:

$$\eta_\psi = \psi_P / \psi_F \quad (1.7)$$

$$\psi_d = \psi_F - \psi_P \quad (1.8)$$

La entropía (S), es una función termodinámica de estado que mide el grado de restricciones que se ha removido de un sistema y comúnmente se asocia al grado de orden que se ha perdido entre un estado y otro, donde el valor de la energía no aprovechada resulta una medida de la irreversibilidad del proceso. [Jaramillo.2008]

$$\Delta S_{total} \geq 0 \quad (1.9)$$

$$\psi_d = W_{rev} - W = T_o * \Delta S_{total} \quad (1.10)$$

## Características Importantes de la Exergía. [Sanz.2014]

- Un sistema en completo equilibrio con su entorno no tiene ninguna exergía. No hay diferencia de temperatura, presión, concentración, etc..., razón por la cual no hay fuerza motriz para cualquier proceso.
- La exergía de un sistema aumenta cuando más se aparta del ambiente.
- Cuando la energía pierde su calidad, se destruye exergía.
- La exergía es la parte de la energía que es útil y por lo tanto tiene un valor económico y por ende, merece un manejo cuidadoso.
- La exergía, por definición, no sólo depende del estado termodinámico de un sistema o de flujo, sino también del estado del medio ambiente.
- Las formas de energías con alto contenido de exergía son típicamente más valoradas y útiles que las formas de energías con baja exergía.
- Los flujos de calor residual a una condición cercana a la ambiental, tienen poca exergía, aunque pueden contener mucha energía y por lo tanto es de valor limitado

## 1.4 Fundamentos Termoeconómicos. [Valero.2001]

El cálculo del coste económico de los flujos, en planta térmica o química constituye un problema de capital importancia, por cuanto está ligado de manera directa con la repercusión de los costes de producción de los distintos componentes que constituyen el proceso productivo, y en consecuencia, a la asignación correcta de los costes de los productos finales.

La termoeconomía sienta las bases teóricas del ahorro de energía, formulando el criterio general que permite evaluar la eficiencia de los sistemas energéticos, explicando de manera racional cuál es el proceso de formación del coste de sus productos.

Donde la verdadera eficiencia termodinámica vendrá dada por la formulación siguiente.

$$\eta_{\psi} = (\psi_P / \psi_F) \leq 1 \quad (1.11)$$

Y la misma representa el “ratio” universal o eficiencia exergética para evaluar la cantidad termodinámicamente los procesos. La inversa de esta función representa el coste unitario del producto.

$$K_p = (\psi_F / \psi_p) = 1/\eta \geq 1 \quad (1.12)$$

donde también se puede expresar en función de la exergía perdida y destruida

$$K_p = 1 + (\psi_L + \psi_d) / \psi_p = 1/\eta \quad (1.13)$$

siendo  $\Psi_L$ ; las pérdidas exergéticas; definiendo el rendimiento exergético por:

$$\eta = 1 - (\psi_L - \psi_d) / \psi_F = \psi_p / \psi_F \quad (1.14)$$

Teniendo en cuenta que en ausencia de residuos y subproductos se cumple que:

El coste exergético de fuel es igual al coste exergético del producto ( $\psi_F^* = \psi_p^*$ ), se define la eficiencia exergética; ( $K_\eta$ ) para un equipo como la relación entre el coste unitario del recurso y el coste unitario del producto.

$$K_\eta = K_F / K_p$$

(1.15)

Una relación del incremento del coste del producto respecto al recurso, que representa cuánto cuesta las irreversibilidades que se generan en un equipo por unidad de producto, es obtenida mediante la diferencia del costo unitario del producto y el costo unitario del fuel (recurso) y es expresada por el factor  $K_r$ , y se define por la ecuación:

$$K_r = K_p - K_F, \text{ adimensional} \quad (1.16)$$

Tomando como base la ecuación (1.15) y (1.16), se puede analizar las irreversibilidades (exergía destruida) para cada equipo mediante el uso de la ecuación siguiente:

$$I = \psi_D = (\psi_p^* K_r) / K_F; kW \quad (1.17)$$

Donde una valoración relativa del comportamiento de la exergía destruida es mediante el factor ratio ( $\gamma_D$ ) de destrucción de exergía, la misma es representada por:

$$\gamma_D = \psi_D / \psi_F, \text{ adimensional} \quad (1.18)$$

#### 1.4.1 Análisis de Costo Exergético. [Batista 2010; Torres.2011; Moreno.2017]

Al analizar el proceso de formación del coste de los flujos internos y producto de un sistema, tomando únicamente en consideración el ambiente físico, la variable relevante es su coste exergético que expresa la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producirlo, dependiendo grandemente de la estructura del sistema de la relación funcional entre equipo y flujos como de la calidad del funcionamiento (rendimiento exergético) de los equipos. Lozano [1997]

El coste exergético de un producto es la cantidad real de exergía necesaria para obtenerlo, y se cumplirá que:

$$\text{Costo exergético} > \text{Exergía}$$

por lo que el coste unitario del recurso y el producto está representado por:

$$K_F^* = (\text{Coste exergético} / \text{exergía}) \quad (1.19)$$

$$K_F^* = \psi_F^* / \psi_F \quad (1.20)$$

$$K_P^* = \psi_P^* / \psi_P \quad (1.21)$$

siendo el coste de operación exergético (CO) por equipo o sistema, el producto del coste unitario exergético del recurso y el flujo de irreversibilidades, expresado por la siguiente ecuación

$$CO = k_F^* * \psi_d; kW \quad (1.22)$$

### 1.4.2 Condiciones que deben satisfacer las relaciones (Fuel –Producto)

1. El fuel (recurso), el producto y la pérdida total no puede ser negativo; lo mismo que sus componentes individuales.

$$\psi_F \geq 0; \psi_P \geq 0; \psi_L \geq 0 \quad (1.23)$$

$$f_J \geq 0; p_J \geq 0; I \geq 0 \quad (1.24)$$

2. La definición de fuel – producto y pérdidas debe satisfacer el balance de exergía del equipo

$$\psi_F = \psi_P + \psi_L + \psi_d \quad (1.25)$$

La condición 1 y 2 garantiza que el rendimiento esté comprendido entre cero y la unidad

$$\psi_P = \psi_F - (\psi_L + \psi_d) \quad (1.26)$$

siendo;  $D > 0$  (2da ley de la termodinámica), si F, P y L también lo son, tendrá que cumplirse que:

$$\psi_P < \psi_F \rightarrow \eta_\beta = (\psi_P / \psi_F) \leq 1 \quad (1.27)$$

### 1.4.3 Costos Exergoeconómicos del Fuel (recurso) y del Producto.

Al tomar en consideración el ambiente económico, las perspectivas se amplían al introducir dos factores adicionales en el análisis. Por una parte los recursos energéticos y de materias primas procesados tendrán una escala de coste o precios de mercado ( $c_F$ ) no ligada necesariamente a sus exergía respectivas. Por otra parte deberán contabilizarse como fuentes de coste la amortización y mantenimiento de la instalación que posibilita la existencia del proceso productivo (Z). [Rahmantian 2016]

En la valoración efectiva de los sistemas tiene una gran importancia la obtención del coste exergoeconómico, donde la misma representa la formación del coste económico de

los flujos internos y productos finales, en el proceso de intercambio de energía, dando lugar al conocimiento de la eficiencia con que son obtenidos; siendo el coste exergoeconómico de un flujo de exergía la suma de la contribución del coste exergético y los coste originados en el proceso productivos asociado a su obtención de capital – operación, mantenimiento, etc.); representado por la ecuación :

$$\pi_F + Z = \pi_P; \$/s \quad (1.28)$$

donde  $\pi_F$  y  $\pi_P$  son el coste exergoeconómico de los flujos que constituyen el fuel y el producto del equipo, y (Z) representa la contribución de los factores no energéticos, por lo que define el coste exergoeconómico como:

$$\pi = c_i * \psi_i; \$/s \quad (1.29)$$

definiendo la misma que el coste exergoeconómico no es más que el producto del coste exergoeconómico unitario ( $c_i$ ) por el flujo de exergía ( $\psi_i$ ). [Gupta.2015; Modal 2017], definiendo el coste exergoeconómico unitario del producto por:

$$c_P = (\pi_P / \psi_P); \$/s \quad (1.30)$$

$$c_P = (Z / \psi_P) + (k_i * c_F) \quad (1.31)$$

Y el recurso por:

$$c_F = (\pi_F / \psi_F) \quad (1.32)$$

La proporción del factor del diferencial de coste relativo;( $Y_K$ ), es expresado como:

$$Y_K = (c_P - c_F) / c_F, \text{ adimensional} \quad (1.33)$$

$$Y_K = ((c_F * (\psi_d + \psi_L) + Z)) / (c_F * \psi_P) \quad (1.34)$$

La misma define el aumento relativo del coste exergético unitario promedio entre el fuel y producto, obteniendo el coste exergoeconómico del producto y el recurso por:

$$\pi_P = (\pi_F + Z) \quad (1.35)$$

$$\pi_F = (c_F * \psi_F) = (K * c_F * \psi_P) \quad (1.36)$$

#### 1.4.4 Factor Exergoeconómico.

La contribución de costo de equipamiento es denominado por el factor exergoeconómico representado por ( $f_i$ ), el mismo expresa la contribución del coste del equipamiento, al aumento del coste exergoeconómico en el equipo, siendo representado por:

$$f_i = ((Z_i) / (Z_i + C \psi D_{ef})) , \text{ adimensional} \quad (1.37)$$

donde:

$C \psi D_{ef}$  = coste de la exergía destruida en el equipo; (\$ /s)

$$C \psi D_{ef} = (\psi_d * c_f) \quad (1.38)$$

$Z_i$  = coste de los equipos por unidad de tiempo; (\$/s)

$$Z_i = ((1 + a) * (\phi * Z_{Ep})) / (N * 3600); [\$ / s] \quad (1.39)$$

Siendo ( $a_i$ ), el factor de amortización y ( $\mathbb{Q}$ ) el factor de operación y mantenimiento

$$a_i = (i * (1 + i)^n) / ((1 + i)^n - 1) \quad (1.40)$$

Para el caso a estudio toma los valores siguientes.

$i$  = factor de amortización (6%)

$\mathbb{Q}$  =factor de operación y mantenimiento (1,05)

$n$ = Tiempo de vida del activo (28 años)

$N$ = Horas de funcionamiento del equipo al año (8760 horas)

$Z_{EP}$  = coste anual del equipo

Ambas expresan la contribución del coste del equipamiento, al aumento del coste exergoeconómico en el equipo; donde si ( $f_i$ ) tiene un valor bajo (cercano a acero), se considera que el equipo requiere mantenimiento, dado que presenta valores altos de

energía destruidas y pérdidas, cuando tiene valores cercanos a uno, se está presentando gastos exagerados para el funcionamiento, lo que se sugiere un cambio de equipo.

### **1.5 CALIDAD DEL AIRE.**

Se define acertadamente la contaminación del aire a la presencia en la atmosfera exterior de uno o más contaminantes y (o) sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que afectan o pueden afectar la vida humana, de animales, de plantas o de la propiedad, que interfiera el goce de vida, la propiedad, el ejercicio de las actividades, y/o cambios climáticos, la cual puede tener diversos orígenes. [Vizcón 2004].

Como parte de la reglamentación de protección medio ambiental, los gases de combustión de las instalaciones industriales están sujetos a normas que establecen los límites máximos permitidos de las emisiones y concentraciones en el aire.

En Cuba se puede establecer la calidad del aire según las NC siguientes:

NC 1020: 2014, Norma Cubana: que establece la Calidad del Aire – Contaminante - Concentraciones Máximas Admisibles y Valores Guías en Zona Habitables.

NC: 19-01-63: 1991, Norma Cubana: Del Sistema de normas de protección e Higiene del Trabajo, Aire de la zona de trabajo, Niveles limites admisibles de las sustancias nocivas.

NC TS 803: 1999, De la Calidad del Aire – Emisiones máximas admisibles, altura mínimas de expulsión y zona de protección sanitarias., entre otras.

La norma cubana de Emisiones aún vigente en Cuba: (NC TS 830:2010) establece las emisiones admisibles (EMA) de contaminantes expulsado a la atmosfera por las fuentes puntuales fijas de instalaciones generadoras de electricidad y vapor. Esta norma rige los valores máximos que son obligatorio cumplir con las (EMA) en correspondencia a su categorías en Centrales Termoeléctricas que usan crudo; Tabla 1.1

*Tabla 1.1 Emisiones máximas admisibles en CTE para el crudo*

*(Referidos a 3% O<sub>2</sub> en gas seco)*

<i>Contaminantes</i>	<i>[mg/m<sup>3</sup>]</i>
<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>10000</i>
<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>5000</i>

*Tabla 1.2 Período de modelación y valores de referencias; [µg/m<sup>3</sup>]*

<i>Contaminantes</i>	<i>Períodos</i>	<i>Valores vigentes</i>
<i>CO</i>	<i>1 hora</i>	<i>25000</i>
	<i>24 horas</i>	<i>8000*</i>
	<i>Media anual</i>	
<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>1 hora</i>	<i>250 (%95)</i>
	<i>24 horas</i>	<i>45(%98)</i>
	<i>Promedio anual</i>	<i>40</i>
<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>1 hora</i>	<i>160(%95)</i>
	<i>24 horas</i>	<i>40(%98)</i>
	<i>Promedio anual</i>	<i>35</i>

Nota:

\* Medida móvil para 8 horas continua

(95%), de las determinaciones del año no deben superar este valor

(98%), de las determinaciones del año no deben superar este valor

### 1.5.1 Técnicas para Estimación de Contaminantes.

- Muestreo de fuente
- Modelos de Emisiones
- Encuestas
- Factores de Emisión
- Balance de Materia
- Extrapolaciones.

### 1.5.2 Ecuación de Estimación de Volumen de gases secos a partir del análisis del combustible

$$V_T = [(8,887 * (C / 100) + (3,374 * (S / 100) + (20,9597 * (H / 100) + .. \\ ..... - (2,6048 * (O / 100) + (0,7997 * (N / 100)); [ Nm^3 / kg ] \quad (1.41)$$

### 1.5.3 Técnicas de Estimación de Volumen de gases secos a partir del análisis del combustible.

La Estimación de los gases contaminantes a la atmosfera se realiza sobre una base del monitoreo en 24 horas, tomando 10 muestras en este periodo de los valores de los contaminantes en los gases de salida en los calentadores de aire regenerativos (CAR)

Los valores medidos de las concentraciones de los contaminantes se obtienen con el equipo analizador de gases de combustión Tipo: TESTO -350 XL

Basado en el resultado de este monitoreo se toma los valores obtenidos de la fuente para la realización de estimación de los contaminantes, siendo la metodología empleada para la concentración del SO<sub>2</sub>, el balance de materia, y para el restos de los contaminantes se utiliza el monitoreo basados en las mediciones directas en la fuente.

## **CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS**

La Metodología empleada esta encamina a reflejar la importancia que tiene la valorización de la energía no solo vista desde el punto potencial y termodinámico, si no también basada sobre la fundamentación de que es lo que ocurre con esa exergía en la obtención del producto final ya sea del sistema, proceso o componente, obteniendo la interrelación que existe entre recursos, productos y exergía, logrando definir donde es que está el mal funcionamiento que se presentan durante todo el proceso productivo al ser evaluado mediante la identificación de la destrucción de exergía, donde a su vez son asociados a factores económicos que nos permiten conocer a que costo se realiza el proceso, logrando poder actuar para alcanzar una mejor eficiencia, sobre aquellos equipos con altos costos de producción, objetivo que es logrado mediante un análisis termoeconómico.

### **2.2.1 Materiales para el Desarrollo de la Metodología.**

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos se elabora un programa en Excel que permite la realización de forma iterativa de los distintos procedimientos para la realización de los cálculos, a partir de la entrada de datos, tomando el programador Tk Solver como apoyo para la obtención de los valores de las propiedades termodinámicas de los flujos Agua – Vapor.

### **2.2.2 Metodología Empleada.**

Se toma como base la Metodología realizada por Molina en el 2015 en su estudio de Modelación Matemática con base de Análisis Exergético de una Caldera Bagacera, donde basado en el estudio de diferentes modelos, obtiene una representación estructural del sistema definido en bloque constructivo de la caldera.

Partiendo de esta base se realiza las adecuaciones necesarias para obtener un complemento único que permitiera la obtención de una metodología general para el análisis exergético y exergoeconómico y medio ambiental del Generador de Vapor (caldera) de la Central Térmica “Antonio Guiteras”

La Metodología empleada es definida por los siguientes pasos.

#### Entrada de datos

1. Datos de entrada de Análisis del Combustible y Concentraciones de Emisiones en la fuente de Emisión.
2. Balance Estequiométrico de la Combustión y Estimación de Emisiones por Mediciones Directas en la fuente de emisión.
3. Balance Indirecto o de las Pérdidas.
4. Definición de Volumen de Control, Estructura Física y Funcional del Sistema.
5. Definición de las condiciones ambientales y de referencias.
6. Definición de bloques que interactúan en el sistema.
7. Identificación de corriente del proceso en fuel (recurso) y del producto.
8. Definición de formulaciones de ecuaciones para el balance energético, exergético.
9. Determinación de los parámetros de entrada para cada bloque constitutivo del proceso.
10. Ejecución del balance energético en cada bloque.
  - Determinación de la temperatura de gases mediante balance.
  - Determinación de calores específicos.
  - Determinación del rendimiento energético.
11. Ejecución del balance exergético en cada bloque.
  - Determinación de propiedades termodinámicas del flujo agua – vapor y gases.
  - Determinación del rendimiento exergético.
  - Determinación de la exergía destruida y ratio de exergía.
  - Determinación del coste unitario exergético del sistema y de las corrientes del proceso.
12. Ejecución del balance termoeconómico en cada bloque.
  - Determinación del coste de la exergía de los sistemas.
  - Determinar consumo exergético de los sistemas.
  - Determinar el coste exergético unitario del fuel (recurso) y del producto de los sistemas.

- Determinar el coste exergético del fuel y del producto de los sistemas.
- Determinar el coste exergoeconómico unitario del fuel y del producto de los sistemas.
- Determinación del factor exergoeconómico de los sistemas.
- Balance económico de los sistemas.

## 2.3 Desarrollo de la Metodología.

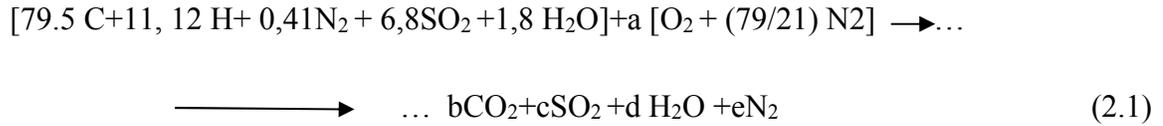
### 2.3.1 Balance Estequiométrico y Estimación de Emisiones Contaminantes.

Tabla 2.1 Datos de entrada para la combustión y Estimación de Emisiones

<i>Datos para la combustión</i>				
<i>i</i>	<i>G<sub>ci</sub></i>	<i>U/M</i>	<i>%</i>	<i>Análisis de los Humos</i>
<i>Carbono</i>	<i>G<sub>c</sub></i>	<i>kgc / kg<sub>comb</sub></i>	79,5	<i>CO = 197 ppm</i>
<i>Hidrogeno</i>	<i>G<sub>h</sub></i>	<i>kgh<sub>2</sub> / kg<sub>comb</sub></i>	11,12	<i>CO<sub>2</sub>=15,67 %</i>
<i>Azufre</i>	<i>G<sub>so<sub>2</sub></sub></i>	<i>kgs<sub>0<sub>2</sub></sub> / kg<sub>comb</sub></i>	6,8	<i>NO = 172 ppm</i>
<i>Oxigeno</i>	<i>G<sub>0<sub>2</sub></sub></i>	<i>kg<sub>0<sub>2</sub></sub> / kg<sub>comb</sub></i>	0,35	<i>NO<sub>x</sub>=210 ppm</i>
<i>Agua</i>	<i>G<sub>h<sub>2</sub>0</sub></i>	<i>kgh<sub>2</sub> / kg<sub>comb</sub></i>	1,8	<i>O<sub>2</sub> =3%</i>
<i>Nitrógeno</i>	<i>G<sub>n<sub>2</sub></sub></i>	<i>kgn<sub>2</sub> / kg<sub>comb</sub></i>	0,41	<i>B= CO<sub>2</sub> / CO=0,7954315</i>
<i>Cenizas</i>	0,02			
<i>α</i>	0,01			<i>R = 8,3144 kJ/kmol</i>
<i>Aire = 283,3333333kg / s</i>				
<i>Combustible = 18,22222222 kg /s</i>				<i>PCI=37932,408 kJ /kg</i>
<i>Tipo de Combustible : Petróleo crudo 1400</i>				

El análisis de la combustión es desarrollado a partir de las reacciones teóricas y reales del proceso, definiendo el proceso mediante las siguientes formulaciones.

Reacción teórica:



Donde: números de moles teóricos; [kmol/kg<sub>comb</sub>]

número de moles teóricos del anhídrido carbónico.

$$n_{CO_2} = (G_c / M_c) \quad (2.2)$$

número de moles teóricos del anhídrido sulfuroso

$$n_{SO_2} = (G_{SO_2} / M_{SO_2}) \quad (2.3)$$

número de moles teóricos del agua

$$n_{H_2O} = (G_{H_2} / 2) + (G_{H_2O} / M_{H_2O}) \quad (2.4)$$

número de moles teóricos de oxígeno

$$n_{O_2} = (n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{H_2O} / 2 + (G_{O_2} / M_{O_2}) / 2) \quad (2.5)$$

número de moles de nitrógeno

$$n_{N_2} = (3,76 * n_{O_2}) \quad (2.6)$$

número de moles teóricos de aire seco

$$n_{as} = (n_{O_2} / 0,21) \quad (2.7)$$

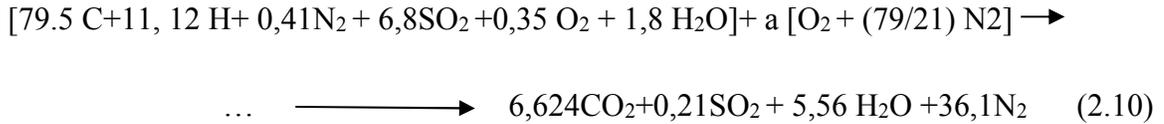
Flujo másico teórico de aire seco; [kg<sub>as</sub> / kg<sub>comb</sub>]

$$M_{fas} = n_{as} * M_{as} \quad (2.8)$$

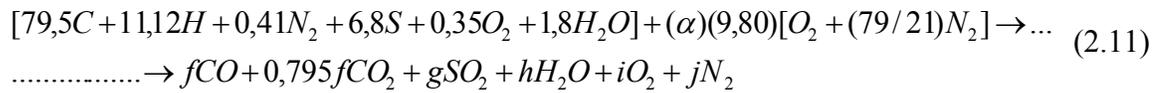
Flujo másico teórico total de aire seco; [kg / s]

$$M_{tas} = M_{fas} * M_{as} \quad (2.9)$$

Reacción Teórica real:



Números de moles reales:



donde:

números de moles reales; [kmol / kg<sub>comb</sub>]

número de moles reales del dióxido de carbono

$$nr_{CO} = ((G_c / M_c) / (1 + B)) \quad (2.12)$$

número de moles reales del anhídrido carbónico

$$nr_{CO_2} = (B) * nr_{CO} \quad (2.13)$$

número de moles reales del anhídrido sulfuroso

$$nr_{SO_2} = (G_{SO_2} / M_{SO_2}) \quad (2.14)$$

número de moles reales del agua

$$nr_{H_2O} = (G_{H_2} / M_{SO_2}) * 2 / (G_{H_2O} / M_{H_2O}) \quad (2.15)$$

número de moles reales de oxígeno

$$nr_{O_2} = (nr_{CO} / 2) + (nr_{CO_2}) + (nr_{SO_2}) + ((nr_{H_2O}) / 2) - ((G_{H_2O} / M_{H_2O}) / 2) - (\alpha * n_{O_2}) \quad (2.16)$$

número de moles reales de nitrógeno

$$n_{n2} = (\alpha * n_{o2}) \quad (3,76) \quad (2.17)$$

número de moles reales de gases secos.

$$n_{rgt} = \sum ((n_{rco} + n_{rco2} + n_{rso2} + n_{ro2} + n_{rn2} + n_{ro2} + n_{h2o})) \quad (2.18)$$

Fracciones molares; [kmol / kg<sub>comb</sub>]

Fracción molar de anhídrido carbónico.

$$Y_{co2} = n_{rco2} / n_{rgt} \quad (2.19)$$

Fracción molar dióxido de carbono; [kmol / kg<sub>rgt</sub>]

$$Y_{co} = n_{rco} / n_{rgt} \quad (2.20)$$

Fracción molar vapor de agua

$$Y_{h2o} = n_{rh2o} / n_{rgt} \quad (2.21)$$

Fracción molar anhídrido sulfuroso

$$Y_{so2} = n_{rso2} / n_{rgt} \quad (2.22)$$

Fracción molar oxígeno

$$Y_{o2} = n_{ro2} / n_{rgt} \quad (2.23)$$

Fracción molar nitrógeno

$$Y_{n2} = n_{rn2} / n_{rgt} \quad (2.24)$$

Flujo másico real de los gases totales; [kg<sub>t</sub> / kg<sub>comb</sub>]

$$f_{gt} = n_{rgt} * M_{gt} \quad (2.25)$$

Flujo de gases totales; [kg / s]

$$F_{gt} = f_{gt} \cdot F_{comb} \quad (2.26)$$

siendo:  $M_{gt}$  = Masa molar de los gases totales;  $F_{comb}$  = Flujo de combustible

Constante universal de los gases perfectos.

$$R = 8,3144 \text{ [kJ / kmol K]}; M_{(Cl)} \text{ [kg / kmol]}$$

$$R_{as} = R / M_{as} = 0,288194107$$

$$R_{h_2O} = R / M_{h_2O} = 0,461500888$$

$$R_g = R / M_{gt} = 0,291285155$$

### 2.3.2 Resultado del Balance de la Combustión.

Tabla 2.2 Números de moles teóricos.

No.	Número teórico	U / M	
$n_{CO_2}$	0,066189326	kmol $CO_2$ / kg $_{comb}$	anhídrido carbónico
$n_{H_2O}$	0,056157842	kmol $H_2O$ / kg $_{comb}$	Agua
$n_{SO_2}$	0,002120692	kmol $SO_2$ / kg $_{comb}$	anhídrido sulfuroso
$n_{O_2}$	0,098010076	kmol $O_2$ / kg $_{comb}$	oxígeno
$n_{N_2}$	0,368704572	kmol $N_2$ / kg $_{comb}$	nitrógeno
$n_{as}$	0,466714649	kmol $as$ / kg $_{comb}$	aires seco
$M_{fas}$	13,46471761	kgas / kg $_{comb}$	Flujo másico aire seco
$M_{tas}$	245,357076	kgas / s	Flujo másico total

Tabla 2.3 Números de moles reales.

No.	Número reales	U / M	
$n_{rco}$	0,036865415	$kmol\ co / kg_{comb}$	dioxido de carbono
$N_{rco_2}$	0,029323911	$kmol\ co_2 / kg_{comb}$	anhidrido carbónico
$n_{rh_2O}$	0,056157842	$kmol\ h_2O / kg_{comb}$	Agua
$n_{rso_2}$	0,002120692	$kmol\ so_2 / kg_{comb}$	anhidrido sulfuroso
$n_{ro_2}$	0,080931676	$kmol\ o_2 / kg_{comb}$	oxígeno
$n_{rn_2}$	0,372203065	$kmol\ n_2 / kg_{comb}$	nitrógeno
$n_{rgt}$	0,577602603	$kmol\ n_2 / kg_{comb}$	gases de combustión
$n_{ras}$	0,385388935	$kmol\ as / kg_{comb}$	aires seco

Tabla 2.4 Fracciones molares

	Fracciones molares	U / M	
$Y_{co_2}$	0,050768316	$kmol\ co_2 / kg_{nrgt}$	anhidrido carbónico
$Y_{co}$	0,063824877	$kmol\ co / kg_{nrgt}$	dióxido de carbono
$Y_{h_2O}$	0,097225743	$kmol\ h_2O / kg_{nrgt}$	Agua
$Y_{so_2}$	0,003671542	$kmol\ so_2 / kg_{nrgt}$	anhidrido sulfuroso
$Y_{o_2}$	0,140116537	$kmol\ o_2 / kg_{nrgt}$	oxígeno
$Y_{n_2}$	0,644392985	$kmol\ n_2 / kg_{nrgt}$	nitrógeno
	Masa molar de los gases de combustión		
	$Mgt. = \sum (Y_{co_2} M_{CO_2} + Y_{co} M_{CO} + Y_{h_2O} M_{h_2O} + Y_{so_2} M_{SO_2} + Y_{o_2} M_{SO_2} + \dots$ $\dots \dots \dots Y_{o_2} M_{SO_2} + Y_{n_2} M_{n_2}) = 28,54385081 [kg_{gt} / kmoles_{gt}]$		
$f_{gt}$	16,48700252	$n_{rgt} * Mgt; [kg_{gt} / kg_{comb}]$	Flujo másico de los gases reales
$F_{at}$	300,4298236	$f_{gt} * F_{com}; [kg_{gt} / s]$	Flujos de gases
Volumen de Gases secos estequiométrico			
$V_{gs} = ((n_{rgt} - n_{rh_2O}) * Mgt) * (22,4 / Mgt) = 11,68036264\ m^3 / kg$			

### 2.3.3 Metodología y Cálculo de la Estimación de Emisiones Contaminante

[IHOBE.2005]

Las concentraciones representan las medias horarias en base seca y corregida al 3% de oxígeno.

La estimación del SO<sub>2</sub> es realiza mediante un balance de materias donde todo el S, contenido en el combustible pasa a formar el 100% del compuesto del SO<sub>2</sub>; ya que no se cuenta con el sensor para medir estas tipo de concentración por el equipo.

Para las demás concentraciones se obtiene las emisiones sobre la base de la toma de mediciones directas de las concentraciones en la fuente de escape.

$$E_{SO_2} = F_{comb} * CC * \left[ \frac{M_{SO_2}}{M_s} \right]; (t/h) \quad (2.27)$$

donde:

F<sub>comb</sub> = flujo de combustible en t / h

CC = concentración del contaminante (S) en el combustible

M<sub>SO<sub>2</sub></sub> = peso molecular del anhídrido sulfuroso

M<sub>s</sub> = peso molecular del azufre

Estimación de Emisiones contaminantes emitidas durante el día

$$E_x = (C_D / 10^3) * V_g * F_{comb(T)} \quad (2.28)$$

Flujo volumétrico de gases de escape

$$V_T = [(8,887 * C / 100) + (3,374 * S / 100) + (20,9597 * H / 100) - (2,6048 * O / 100) + ..... \\ ..... + 0,7997 * N / 100]: [Nm^3 / kg] \quad (2.29)$$

Corrección al 3% de O (2.30)

$$x_{O_2} = (21/(21 - O_{2X})) \quad (2.30)$$

Volumen de gases secos corregidos al 3% de O<sub>2</sub>

$$V_g = (V_T * x_{O_2}); [Nm^3 / kg] \quad (2.31)$$

donde:

C<sub>D</sub> = concentración de media diaria expresada en mg/Nm<sup>3</sup> en base seca y corregida al 3%

V<sub>g</sub> = volumen de gases en unidad de combustible, expresado en base seca y corregido al 3% del O<sub>2</sub>, expresado en Nm<sup>3</sup>/kg

F<sub>comb(T)</sub> = cantidad de combustible consumido en t/h

Conversión de unidades de ppm a mg/Nm<sup>3</sup>

$$mg / Nm^3 = ((M_{(ci)}) / (22,4)) * ppm \quad (2.32)$$

M<sub>(ci)</sub> = peso molecular del contaminante emitido.

22,4 = volumen molar en condiciones normales

*Tabla 2.5 Concentraciones Medias de la Estimación de Contaminantes en un día*

<i>Fuente Salida gases Car</i>	<i>Concentraciones de Emisiones en MD</i>			
	<i>Promedio de mediciones en 24 horas frecuencia de monitoreo en la fuente (10 en 24horas)</i>			
		<i>ppm</i>	<i>mg/Nm3</i>	<i>M<sub>(ci)</sub>(kg/kmol)</i>
	<i>CO</i>	<i>197</i>	<i>246,3379464</i>	<i>28,01</i>
	<i>NO</i>	<i>172</i>	<i>230,3571429</i>	<i>30</i>
	<i>NO<sub>X</sub></i>	<i>210</i>	<i>431,25</i>	<i>46</i>
	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>1567</i>	<i>3078,735268</i>	<i>44,01</i>

siendo:

MD = mediciones directas en la fuente. (realizadas por entidad certificada)

Tabla 2.6 Resultado de Estimación de Emisiones Contaminantes

Estimación de Emisiones Contaminantes				
	T/h	kg/s	t/d	t /m3 de aire
CO	220,2106263	61,16961841	5285,055031	1,91264E-07
NO	205,9247933	57,20133147	4942,195039	1,78856E-07
NO <sub>x</sub>	385,5103688	107,0862136	9252,248852	3,34835E-07
CO <sub>2</sub>	2752,195637	764,4987882	66052,6953	3,34835E-07
SO <sub>2</sub>	8,91241825	2,475671736	213,898038	

### 2.3.4 Cálculo de las pérdidas de energía en gases de combustión.

- Pérdida por Calor en gases secos

$$Q_{gs} = f_{gt} * cp_{gt} * (T_{gs} - T_0); [kJ / kgcomb] \quad (2.33)$$

donde:

$f_{gt}$  = caudal de gases secos; =16,83892634 [kg<sub>gt</sub>/ kgcomb]

$cp_{gt}$  = calor específico de los gases secos salida; =0,9327293 [kJ / kg K]

$T_{gt}$  = 430,725;  $T_0$  = 305,15

(Temperatura de salida de gases secos y Temperatura ambiente; en [K])

- Pérdida por calor en el vapor de agua proveniente del hidrógeno del combustible.

$$Q_{H_2} = 9 * \%H_2 * (584 * 4,1868) + (cp_{H_2O}) * (T_{gs} - T_0); [kJ / kgcomb] \quad (2.34)$$

donde:

$\%H_2$  = % de hidrógeno en el combustible = 0,1112

$cp_{H_2O}$  = calor específico del vapor en los gases secos = 1,88406 [kJ/kg K]

- Pérdida de calor por vapor de agua proveniente de la humedad del aire

$$Q_{H_2O} = f_{gt} * W_{aire} * (cp_{H_2O}) * (T_{gs} - T_0); [kJ / kgcomb] \quad (2.35)$$

donde:

$W_{\text{aire}} = \text{contenido de humedad del aire; [kg}_{\text{h}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{gt}}] = 0,001$

- Pérdida por calor por combustión incompleta del carbono

$$Q_{CO} = \%C_{comb} * ((\%CO)/(\%CO_2 + \%CO)) * (5644 * 4,1868); [kJ / kgcomb] \quad (2.36)$$

donde:

$C = 0,795 \%$        $CO = 0,1567\%$        $CO_2 = 0,197$

- Pérdida por radiación

$$PR = \%FR * PCI \quad (2.37)$$

donde:

$FR = \text{factor de cálculo} = 0,32 \%$

$PCI = \text{Poder calorífico Inferior} = 37932,408; [kJ/kg]$

*Tabla 2.7 Balance por Método Indirecto*

<i>Ítem de Pérdidas</i>	<i>Pérdidas de energía en gases</i>	
	<i>kJ/kgcomb</i>	<i>%</i>
$Q_{gs}$	1927,781664	5,082149448
$Q_{H2}$	2683,167432	7,073548907
$Q_{H2O(aire)}$	3,891003115	0,010257728
$Q_{CO}$	233,2425354	0,614889873
$PR$	121,3837056	0,32
<i>Total</i>	4969,466339	13,10084596

$\eta$  (rendimiento energético) = 86,89915404 %

$$\eta_{\text{energético}} = 100 - ((\Sigma(Pérdidas) * (100)) / (PCI)) \quad (2.38)$$

## 2.4 Balance Energético-Exergético.

### 2.4.1 Definición del Volumen de Control y Estructura Funcional del Sistema.

El volumen de control representa la idealización de las divisiones de las fronteras de los equipos, componentes o procesos a estudiar, la misma puede ser real o imaginaria, donde todo lo que este dentro de ella corresponde al sistema y fuera de ella al medio o entorno.

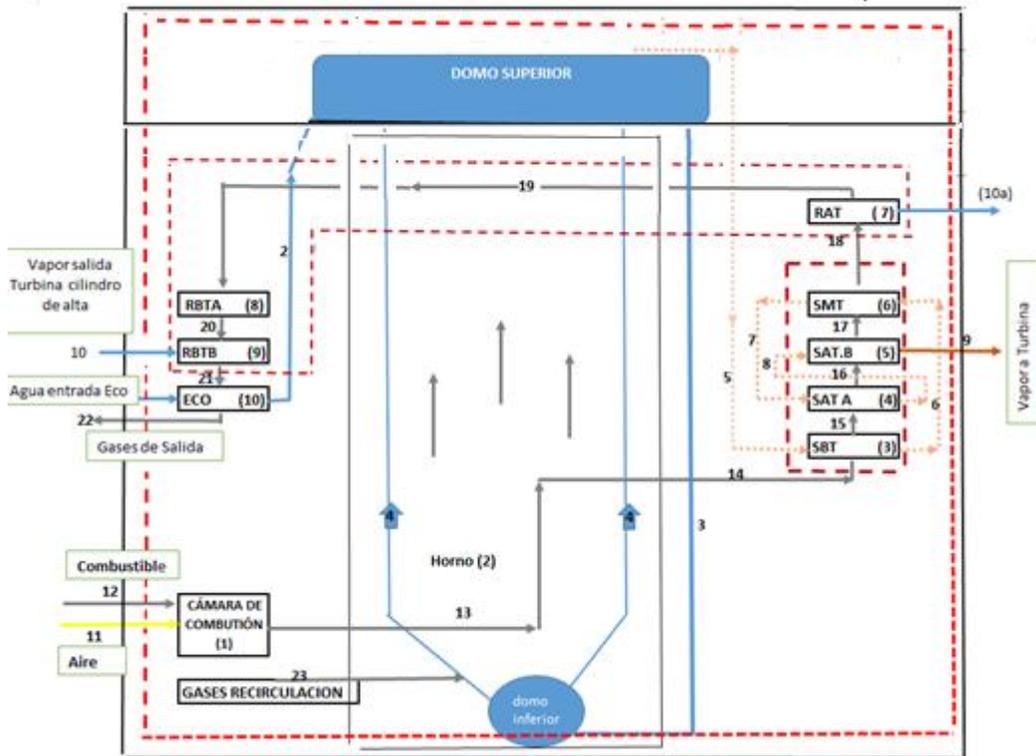


Figura 1.1 Volumen de Control del sistema de Generación de Vapor CTE .Guiteras.

La estructura física representa la relación que existe entre los diferentes equipos o componentes con sus respectivos flujos en un sistema energético describiendo su adecuada ubicación con los diversos flujos que circulan por ellos, representando el grado de agregación del sistema, siendo representada para nuestro caso a estudio dentro del V.C.

La estructura funcional parte de la estructura física del sistema a evaluar, distribuyendo los flujos en función de su propósito dentro de cada equipo o componente en recursos –

productos o residuos teniendo como base la estructura productiva que adopte el evaluador de acuerdo a la finalidad y propósitos que se quieran alcanzar.

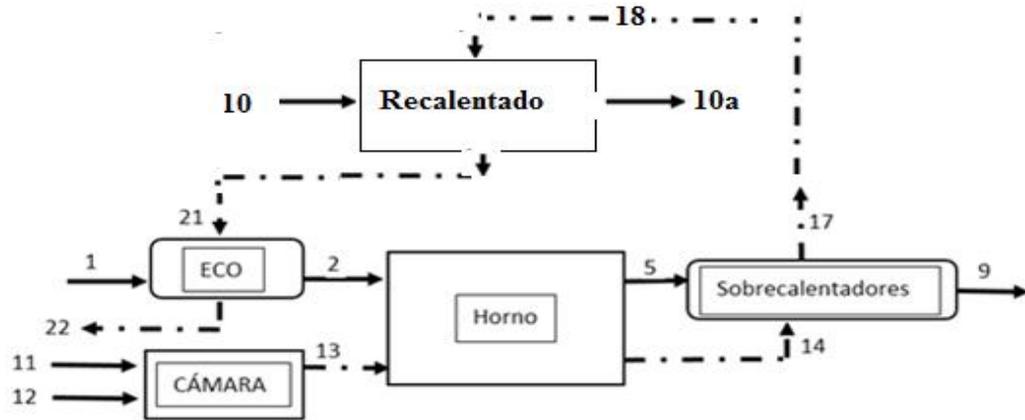


Figura 1.2 Estructura funcional del Sistema

#### 2.4.2 Ambiente de Referencia.

El ambiente de Referencia identifica las propiedades Termodinámicas del medio ambiente, siendo estas el punto de partida para la realización de los respectivos cálculos.

(Para el caso a estudio del Sistema de Generación de Vapor se representa en la tabla 2.8)

Tabla 2.8 Parámetros del Ambiente de Referencia

<i>Parámetro</i>		<i>Unidad de Medida</i>
$T_o$	305,15	$K$
$P_o$	100000	$Pa$
$T_r$	273,15	$K$
$P_r$	100000	$Pa$

donde :

To = Temperatura ambiente punto muerto

Po = Presión ambiente punto muerto

Tr = Temperatura de referencia punto muerto

Pr = Presión de referencia punto muerto

*Tabla 2.9 Parámetros Ambiente del flujo agua – vapor.*

<i>Entalpia</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>Entropía</i>	<i>kJ/kg K</i>
$h_o$	134,099	$S_o$ aire seco	0,464

*Tabla 2.10 Parámetros Ambiente para Gases.*

<i>Calor específico</i>	<i>kJ/kg K</i>	<i>Entalpia</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>Entropía</i>	<i>kJ/kg K</i>
$C_{p_o}$ aire seco	1,00722	$h_o$ aire seco	307,35	$S_o$ aire seco	0,1116
$C_{p_o}$ gases	1,011164	$h_o$ gases	308,57	$S_{o gases}$	0,1120
$C_{p_o}$ agua	1,88464	$h_o$ agua			

Ecuación para obtener el calor específico molar de acuerdo a la temperatura; [kJ/kg- K]

$$C_{Pgase.} = \sum (C_{pco_2} * Y_{CO_2} + C_{pco} * Y_{CO} + C_{ph_2o} * Y_{h_2o} + C_{pso_2} * Y_{SO_2} + C_{po_2} * Y_{O_2} + \dots + C_{pn_2} * Y_{n_2}) \quad (2.39)$$

calor específico de los gases totales; [kJ/kg K]

$$C_{pgt} = (C_{ptgases} / M_{gt}) \quad (2.40)$$

siendo:  $Y_{CO_2}$ ;  $Y_{CO}$ ;  $Y_{H_2O}$   $Y_{SO_2}$ ;  $Y_{O_2}$ ;  $Y_{N_2}$ ; la fracción molar del anhídrido carbónico, dióxido de carbono, agua, anhídrido sulfuroso, oxígeno y el nitrógeno, correspondiendo el valor de Mgt a la masa molecular de la mezcla gaseosa de los gases de la combustión, siendo la misma obtenida en el balance estequiométrico.

Para el cálculo del calor específico del aire atmosférico y el aire de combustión, los mismos son obtenidos por interpolación de acuerdo a la temperatura de trabajo

*Tabla 2.11 Interpolación calor específico del aire atmosférico.*

$T_0$ K	$T_x$ K	$T_y$ K	$C_{py}$ kJ/kg-K	$C_{px}$ kJ/kg-K	$C_{p0\text{ aire}}$ kJ/kg-K
305,5	300	350	1,009	1,007	1,00722

*Tabla 2.12 Interpolación calor específico Aire de combustión*

$T_{11}$ K	$T_x$ K	$T_y$ K	$C_{py}$ kJ/kg-K	$C_{px}$ kJ/kg-K	$C_{p11\text{ aire}}$ kJ/kg-K
535,44	500	550	1,04	1,03	1,037088

### 2.4.3 Sistemas que intervienen en el proceso

*Tabla 2.13 Definición de Bloques del Proceso*

<i>Equipos</i>		<i>Proceso</i>	<i>Producto</i>
<i>A</i>	<i>Cámara de Combustión</i>	<i>Combustión</i>	<i>Gases de Combustión</i>
<i>B</i>	<i>Horno</i>	<i>Flujo de Gases</i>	<i>Flujo de Gases</i>
<i>C</i>	<i>Sobrecalentadores</i>	<i>Transferencia de Calor</i>	<i>Salida Vapor a Turbina</i>
<i>D</i>	<i>Economizador</i>	<i>Transferencia de Calor</i>	<i>Salida Agua Saturada</i>
<i>E</i>	<i>Recalentadores</i>	<i>Transferencia de Calor</i>	<i>Salida vapor recalentado de caldera</i>

Tabla 2.14 Definición de Recursos y Productos

No Bloques		Recursos	Productos
A	Cámara de Combustión	$(\psi_{11} + \psi_{12})$	$(\psi_{13})$
B	Horno	$(\psi_{13} - \psi_{14})$	$(\psi_5 - \psi_2)$
C	Sobrecalentadores	$(\psi_{14} - \psi_{17})$	$(\psi_9 - \psi_5)$
D	Economizador	$(\psi_{21} - \psi_{22})$	$(\psi_2 - \psi_1)$
E	Recalentadores	$(\psi_{18} - \psi_{21})$	$(\psi_{10a} - \psi_{10})$

Consideraciones para los costes exergeticos unitarios

En ausencias de asignaciones externas, el costo exergetico unitario de los flujos de entrada al sistema es igual a su exerquia ;  $K_{11}; K_{12}; K_1 = 1$

$K_{13} = K_{14} = K_{17} = k_{18} = K_{21} = K_{22}$  ; Incógnitas;  $K_2, K_5, K_9, K_{10a}, K_{10}, K_{13}$

Tabla 2.15 Obtención del coste unitario exergetico

Ecuaciones
$((\psi_{11} * k_{11} + \psi_{12} * k_{12})) / (\psi_{13}) = k_{13}$
$((k_{13} * (\psi_{13} - \psi_{14})) + ((\psi_2 * k_2)) / (\psi_5) = k_5$
$((k_{13} * (\psi_{21} - \psi_{22}) + (k_1 * \psi_1)) / (\psi_2) = k_2$
$((k_{13} * (\psi_{14} - \psi_{17})) + ((\psi_5 * k_5)) / (\psi_9) = k_9$
$((k_{13} * (\psi_{18} - \psi_{21})) / ((\psi_{10a} - \psi_{10}) = k_{10}$

Tabla 2.16 Corrientes Termodinámicas del Proceso.

<i>Corriente</i>	<i>Flujo de masa</i>	<i>Flujo de exergía [MW]</i>	<i>Coste exergético unitario; adimensional</i>
1	<i>Flujo entrada agua Eco</i>	57,01	1
2	<i>Flujo salida agua al Eco</i>	82,85	1,154101403
5	<i>Flujo entrada vapor SBT</i>	133,56	1,452209298
9	<i>Flujo vapor a Turbina</i>	361,82	1,491776858
10	<i>Flujo vapor entrada Recalentado</i>	234,13	1,314543498
10a	<i>Flujo vapor salida Recalentado</i>	281,55	1,31
11	<i>Flujo Aire de combustión</i>	18,83	1,00
12	<i>Flujo de combustible</i>	691,21	1,00
13	<i>Gases productos de la combustión</i>	501,50	1,029071741
14	<i>Flujo gases salida horno</i>	405,95	1,029071741
17	<i>Flujo gases salida SAT</i>	69,91	1,029071741
18	<i>Flujo gases entrada Recalentador</i>	137,45	1,029071741
21	<i>Flujo gases entrad Eco</i>	76,87	1,029071741
22	<i>Flujo gases salida</i>	39,35	1,029071741

*Nota: Para la realización de los cálculos partiendo que contamos como incógnita la temperatura de la corriente 14 en el balance del sobrecalentador, se asigna la secuencia para el balance descrita posteriormente para de esta formar obtener la corriente 13 .*

*Continuidad para la ejecución del balance*

1. *Balance sobrecalentadores*
2. *Balance horno*
3. *Balance recalentadores*
4. *Balance Economizador*

## 2.4.4 Balance Energético – Exergético de Cámara de Combustión

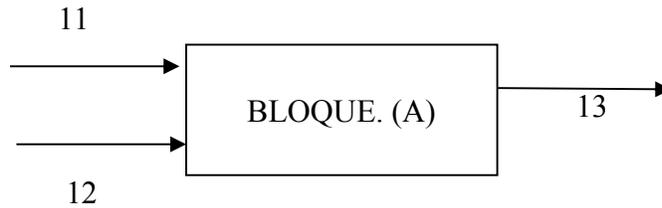


Tabla 2.17 Datos de entradas Cámara de combustión.

<i>Flujos</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Presión</i>	<i>Flujo</i>
	<i>K</i>	<i>Pa</i>	<i>kg /s</i>
<i>11</i>	<i>535,44</i>	<i>632</i>	<i>283,3333333</i>
<i>12</i>			<i>18,22222222</i>
<i>13</i>	<i>??</i>	<i>3047</i>	<i>304,43</i>
<i>P CI</i>	<i>37932,408; kJ/kg</i>		

Datos de Cálculo

P C I = Poder calorífico inferior

$m_{11}$  = Flujo aire de combustión

$P_{11}$  = Presión aire salida car

$T_{11}$  = Temperatura aire salida car

$m_{12}$  = Flujo de combustible

$P_{12}$  = Presión crudo entrada a quemadores

$T_{12}$  = Temperatura crudo entrada a quemadores

$m_{13}$  = Flujo de gases producto de la combustión

$P_{13}$  = Presión en el horno

Balance de masa

$$m_{aire} + m_{combustible} = m_{gases} \quad (2.41)$$

Balance de energía en cámara de combustión

$$(m_{11}h_{11} + m_{12}h_{12}) = m_{13}h_{13} \quad (2.42)$$

$$(m_{12} * PCI + m_{11}h_{11}) = m_{13} * h_{13} + Q_{perdgs} \quad (2.43)$$

Calor de combustión adiabático

$$Q_{cc} = m_{combustible} * PCI ; [kW] \quad (2.44)$$

Entalpía de los gases de combustión

$$h_i = Cp_i * (T_i + 273,15); [kJ / kg] \quad (2.45)$$

$$\Delta h_i = Cp_i * (T_i + 273,15) - T_o); [kJ / kg] \quad (2.46)$$

Entropía de los gases de combustión

$$S_i = Cp_i * Ln(T_1 / T_o) - R_g * Ln(P_i / P_o); [kJ / kgK] \quad (2.47)$$

Exergía de los gases de combustión

$$\beta_i = Cp_i * [(T_i - T_o) - T_o * Ln(T_i / T_o)] + R * Ln(P_i / P_o); kW \quad (2.48)$$

Flujo de exergía

$$\psi_i = m_i * \beta_i; [kW] \quad (2.49)$$

$$\text{Rendimiento exergético} \quad \eta_\psi = \psi_{13} / (\psi_{11} + \psi_{12}) , \text{ adimensional} \quad (2.50)$$

Rendimiento térmico de la combustión, adimensional

$$\eta_{T_{cc}} = 1 - \left( \frac{Q_{Pg}}{PCI} \right) \quad (2.51)$$

### 2.4.5 Balance Energético – Exergético del Horno.

Balance Horno

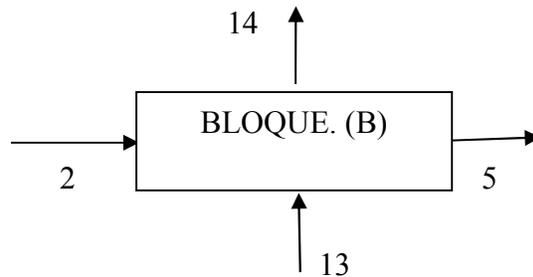


Tabla 2.18 Datos de entradas Horno.

Flujos	Temperatura	Presión	Flujo	Entalpía	Entropía
	K	Pa	kg /s	kJ/kg	kJ/kg-K
2	556,15	175,75*10 <sup>5</sup>	258,24	1247,34	3,061
5	625,24	173,76*10 <sup>5</sup>	251,07	1683,96	3,8
13	??	3047	300,43	----	---
14	1720,20	3047	300,43	2285,38	3,31

Datos de Cálculo

m<sub>2</sub> = Flujo agua salida ECO

P<sub>2</sub> = Presión ECO

T<sub>2</sub> = Temperatura salida ECO

m<sub>5</sub> = Flujo de vapor entrada SBT

P<sub>5</sub> = Presión entrada SBT

$T_5$  = Temperatura entrada SBT

$m_{14}$  = Flujo gases salida horno

$P_{14}$  = Presión salida horno

$T_{14}$  = Temperatura salida horno.

Balance de energía en el Horno.

Balance de energía en el Horno.

$$(m_{13}h_{13} + m_2h_2) = m_{14}h_{14} + m_5h_5 \quad (2.52)$$

$$h_{13} = (m_{14}h_{14} + m_5h_5) - m_2h_2) / m_{13} \quad (2.53)$$

Calor absorbido

$$Q_{abs} = m_i * (h_5 - h_2); [kW] \quad (2.54)$$

Calor suministrado

$$Q_{sum} = m_{14} * (h_{14} - h_{13_2}); [kW] \quad (2.55)$$

Rendimiento energético

$$\eta_{energ} = (Q_{ABS} / Q_{sum}) , \text{ adimensional} \quad (2.56)$$

Exergía Flujo Agua -vapor

$$\beta = (h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o); kW \quad (2.57)$$

Entalpía de las corrientes para gases

$$h_i = Cp_i * (T_i + 273,15); [kJ / kg] \quad (2.58)$$

Entropía de los gases de combustión

$$S_i = Cp_i * Ln(T_1 / T_o) - R_g * Ln(P_i / P_o); [kJ / kgK] \quad (2.59)$$

Exergía de los gases de combustión

$$\beta_i = Cp_i * [(T_i - T_o) - T_o * Ln(T_i / T_o)] + R * Ln(P_i / P_o); kW \quad (2.60)$$

Flujo de exergía

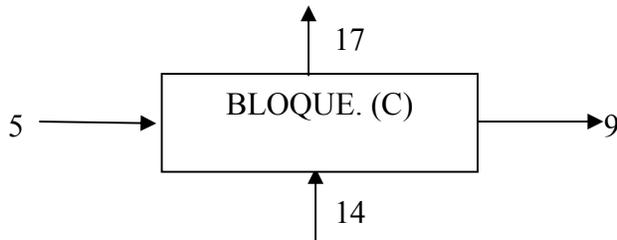
$$\psi_i = m_i * \beta_i; [kW] \quad (2.61)$$

Rendimiento exergético

$$\eta_\psi = (\psi_5 - \psi_2) / (\psi_{13} - \psi_{14}), \text{ adimensional} \quad (2.62)$$

#### 2.4.6 Balance Energético - Exergético de Sobrecalentadores.

Balance Sobrecalentadores



Nota: El flujo de la corriente 5 para entrada SBT, se toma con la presión y temperatura de saturación del domo, por ausencia de datos del flujo de entrada a sobrecalentadores.

Tabla 2.19 Datos de entradas en Sobrecalentadores

Flujos	Temperatura	Presión	Flujo	Entalpía	Entropía
	<i>K</i>	<i>Pa</i>	<i>kg /s</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg-K</i>
5	625,24	173,76*10 <sup>5</sup>	251,07	1683,96	3,8
9	814,15	162,74*10 <sup>5</sup>	251,07	3439,265	6,420
14	??	3047	300,43	-----	-----
17	742,44	3421	300,43	857,39	2,01

Datos de Cálculos:

$m_5$  = Flujo de vapor entrada SBT

$P_5$  = Presión en el Domo

$T_5$  = Temperatura entrada SBT

$m_9$  = Flujo de vapor a turbina

$P_9$  = Presión salida vapor a turbina

$T_9$  = Temperatura salida vapor a turbina

$m_{14}$  = Flujo de gases producto de la combustión

$P_{14}$  = Presión en el horno

$T_{17}$  = Temperatura gases salida SAT

$P_{17}$  = Presión gases salida SAT

Balance de energía Sobrecalentadores

$$(m_{14}h_{14} + m_5h_5) = m_{17}h_{17} + m_9h_9 \quad (2.63)$$

$$h_{14} = (m_{17}h_{17} + m_9h_9) - m_5h_5) / m_{14} \quad (2.64)$$

Calor absorbido

$$Q_{abs} = m_5 * (h_9 - h_{5_2}); [kW] \quad (2.65)$$

Calor suministrado

$$Q_{sum} = m_{17} * (h_{17} - h_{14}); [kW] \quad (2.66)$$

Rendimiento energético

$$\eta_{energ} = (Q_{ABS} / Q_{sum}) , \text{ adimensional} \quad (2.67)$$

Exergía Flujo Agua -vapor

$$\beta = (h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o); kW \quad (2.68)$$

Entalpía de las corrientes para gases

$$h_i = Cp_i * (T_i + 273,15); [kJ / kg] \quad (2.69)$$

Entropía de los gases de combustión

$$S_i = Cp_i * Ln(T_i / T_o) - R_g * Ln(P_i / P_o); [kJ / kgK] \quad (2.70)$$

Exergía de los gases de combustión

$$\beta_i = Cp_i * [(T_i - T_o) - T_o * Ln(T_i / T_o)] + R * Ln(P_i / P_o); [kJ / kg] \quad (2.71)$$

Flujo de exergía

$$\psi_i = m_i * \beta_i; [kW] \quad (2.72)$$

Rendimiento exergético

$$\eta_{\psi} = (\psi_5 - \psi_9) / (\psi_{17} - \psi_{14}) , \text{ adimensional} \quad (2.73)$$

### 2.4.7 Balance Energético y Exergético de Economizador.

Balance Economizador.

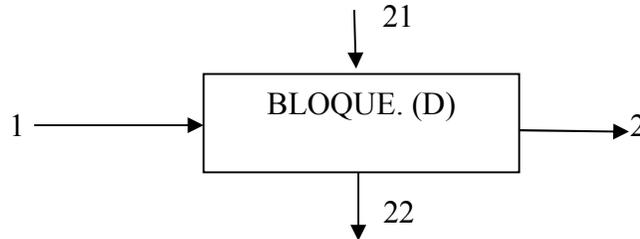


Tabla 2.20 Datos de entradas Economizador.

Flujos	Temperatura	Presión	Flujo	Entalpía	Entropía
	K	Pa	kg /s	kJ/kg	kJ/kg-K
1	505,97	175,75*10 <sup>5</sup>	258,24	106,57	2,6
2	556,15	175,75*10 <sup>5</sup>	258,24	1247,34	3,061
21	728,15	2992	300,43	893,562	2,10
22	??	1527,5	300,43	---	---

Balance de energía Economizador.

$$(m_{21}h_{21} + m_1h_1) = m_{22}h_{22} + m_2h_2 \quad (2.74)$$

Calor absorbido

$$Q_{abs} = m_i * (h_2 - h_1); [kW] \quad (2.75)$$

Calor suministrado

$$Q_{sum} = m_{22} * (h_{22} - h_{21}); [kW] \quad (2.76)$$

Rendimiento energético

$$\eta_{energ} = (Q_{ABS} / Q_{sum}) , \text{ adimensional} \quad (2.77)$$

Exergía Flujo Agua -vapor

$$\beta = (h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o); kW \quad (2.78)$$

Entalpía de las corrientes para gases

$$h_i = Cp_i * (T_i + 273,15); [kJ / kg] \quad (2.79)$$

Entropía de los gases de combustión

$$S_i = Cp_i * Ln(T_i / T_o) - R_g * Ln(P_i / P_o); [kJ / kgK] \quad (2.80)$$

Exergía de los gases de combustión

$$\beta_i = Cp_i * [(T_i - T_o) - T_o * Ln(T_i / T_o)] + R * Ln(P_i / P_o); kW \quad (2.81)$$

Flujo de exergía

$$\psi_i = m_i * \beta_i; [kW] \quad (2.82)$$

Rendimiento exergético

$$\eta_{\psi} = (\psi_2 - \psi_1) / (\psi_{21} - \psi_{22}) , \text{ adimensional} \quad (2.83)$$

### 2.4.8 Balance Energético y Exergético de Recalentador.

Balance Recalentador.

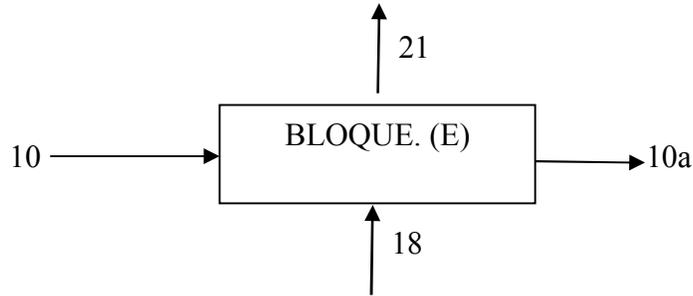


Tabla 2.21 Datos de entradas Recalentador.

Flujos	Temperatura	Presión	Flujo	Entalpía	Entropía
	K	Pa	kg /s	kJ/kg	kJ/kg-K
10	633,51	31,64*10 <sup>5</sup>	216,15	3136,92	6,755
10a	809,63	29,92*10 <sup>5</sup>	216,15	3534,81	7,340
18	??	2992	304,43	---	---
21	728,15	2992	300,43	893,562	2,10

*El flujo de recalentado se obtiene con la ecuación dada por fabricante*

$$m_{10a} = \left( K * \frac{P_{(10a)BAR}}{\sqrt{(t_{(10a)} + 273,15)}} \right) / (3,6); \text{kg} / \text{s}$$

donde:

K=740

P<sub>10a</sub>= Presión de salida vapor recalentado; bar

T<sub>10a</sub>= Temperatura de salida recalentado; K

Balance de energía Recalentador.

$$(m_{18}h_{18} + m_{10}h_{10}) = m_{21}h_{21} + m_{10a}h_{10a} \quad (2.84)$$

Calor absorbido

$$Q_{abs} = m_i * (h_{10a} - h_{10}); [kW] \quad (2.85)$$

Calor suministrado

$$Q_{sum} = m_{18} * (h_{18} - h_{21}); [kW] \quad (2.86)$$

Rendimiento energético

$$\eta_{energ} = (Q_{ABS} / Q_{sum}), \text{ adimensional} \quad (2.87)$$

Exergía Flujo Agua -vapor

$$\beta = (h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o); kW \quad (2.88)$$

Entalpía de las corrientes para gases

$$h_i = Cp_i * (T_i + 273,15); [kJ / kg] \quad (2.89)$$

Entropía de los gases de combustión

$$S_i = Cp_i * Ln(T_i / T_o) - R_g * Ln(P_i / P_o); [kJ / kgK] \quad (2.90)$$

Exergía de los gases de combustión

$$\beta_i = Cp_i * [(T_i - T_o) - T_o * Ln(T_i / T_o)] + R * Ln(P_i / P_o); kW \quad (2.91)$$

Flujo de exergía

$$\psi_i = m_i * \beta_i; [kW] \quad (2.92)$$

Rendimiento exergético

$$\eta_{\psi} = (\psi_{10a} - \psi_{10}) / (\psi_{18} - \psi_{21}) , \text{ adimensional} \quad (2.93)$$

#### 2.4.9 Resultado del Balance Energético y Exergético Flujo Agua – Vapor y Gases.

Tabla 2.22 Propiedades Termodinámicas Flujo Agua – Vapor.

No.	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>H</i>	<i>S</i>	$\beta$	$\psi$
	(kg/s)	(K)	(Pa)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(kW)	(kW)
0		305,15	100000	134,099	0,464		
1	258,24	505,97	175,75*10 <sup>5</sup>	1006,57	2,600	220,743506	57005,784
2	258,24	556,15	175,75*10 <sup>5</sup>	1247,34	3,061	320,839356	82854,98117
5	251,07	625,24	173,76*10 <sup>5</sup>	1683,96	3,800	531,953506	133555,7935
9	251,07	807,34	162,74*10 <sup>5</sup>	3392,65	6,420	1441,15051	361824,8536
10	216,15	633,51	31,64*10 <sup>5</sup>	3136,92	6,755	1083,19526	234128,4884
10a	216,15	809,63	29,92*10 <sup>5</sup>	3534,81	7,340	1302,572506	281546,0373

Tabla 2.23 Calores específicos obtenidos

Flujos	Calores específicos
	kJ/kg K
11	1,03709
13	1,35041
14	1,32855
17	1,15483
18	1,21639
21	1,16283
22	1,11203

Tabla 2.24 Propiedades Termodinámicas (Flujo Gases).

No.	$M$ (kg/s)	$T$ (K)	$P$ (Pa)	$H$ (kJ/kg)	$S$ (kJ/kg K)	$\beta$ (kW)	$\psi$ (kW)
11	283,3333333	535,44	6320	555,30	1,38	66,44524	18826,15196
12	18,22222222						691212,768
13	300,4298236	1962,80	3047	2650,62	3,53	1669,27	501499,4186
14	300,4298236	1720,20	3047	2285,38	3,31	1351,23	405949,3115
17	300,4298236	742,44	3421	857,39	2,01	232,69	69907,6497
18	300,4298236	973	2992	1183,544	2,43	457,50	137445,2535
21	300,4298236	768,44	2992	893,562	2,10	255,88	76873,74225
22	300,4298236	617,4	1527,5	686,568	2,00	130,97	39347,43143
	PCI	37932,408		kJ/kg			

Tabla 2.25 Rendimiento energético

No Bloques	$Q_{abs}; kW$	$Q_{sum}; kW$	$\eta_i$
A Cámara		691212,768	0,87
B Horno	109620,728	109639,7368	0,99983
C Sobrecalentadores	428995,10	429009,258	0,99997
D Economizador	62177,51	62186,97432	0,999848
E Recalentador	86002,39	87119,31363	0,987179
AE Sistema	599065,15		0,87

Tabla 2.26 Destrucción de exergía y ratio de exergía destruida

No Bloques		Recursos (kW)	Productos (kW)	$\psi_d$ ; (Kw)	$\Upsilon_d$ (adim)
A	Cámara de Combustión	$(\psi_{11} + \psi_{12})$	$(\psi_{13})$	208539,50	0,29
		710038,92	501499,42		
B	Horno	$(\psi_{13} - \psi_{14})$	$(\psi_5 - \psi_2)$	44849,29	0,47
		95550,10716	50700,81		
C	Sobrecalentadores	$(\psi_{14} - \psi_{17})$	$(\psi_9 - \psi_5)$	107772,60	0,32
		336041,6618	228269,06		
D	Economizador	$(\psi_{21} - \psi_{22})$	$(\psi_2 - \psi_1)$	11677,11	0,31
		37526,31082	25849,20		
E	Recalentador	$(\psi_{18} - \psi_{21})$	$(\psi_{10a} - \psi_{10})$	13153,96	0,22
		60571,51123	47417,55		
AE	Sistema	738229,09	352236,62	385992,47	0,52
$\Sigma (F) - \Sigma (P) = \Delta\psi$					
Ratio de exergía destruida = $\Upsilon_d = (\psi_d / \Psi_{Fi})$					

Tabla 2.27 Rendimiento exergético y Coste unitario exergético.

	Bloque	$\eta\psi$	$K_i^*$
A	Cámara	0,71	1,42
B	Horno	0,53	1,88
C	Sobrecalentadores	0,68	1,47
D	Economizador	0,69	1,45
E	Recalentadores	0,78	1,28
AE	Sistema	0,48	2,10

$$\eta_{\psi} = \frac{\sum P}{\sum F_{(\text{Recursos})}} \quad (2.94)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.94), se obtiene el rendimiento exergético del sistema

$$\eta_{\psi} = \frac{(\psi_2 - \psi_1) + (\psi_5 - \psi_2) + (\psi_9 - \psi_5) + (\psi_{10a} - \psi_{10})}{(\psi_{21} - \psi_{22}) + (\psi_{11} + \psi_{12} - \psi_{13}) + (\psi_{13} - \psi_{14}) + (\psi_{14} - \psi_{17}) + (\psi_{18} - \psi_{21})} \quad (2.95)$$

donde el costo exergético unitario de los equipos se obtiene con la ecuación siguiente.

$$K^* = \frac{1}{\eta_{\psi}} = 1 + \frac{(\psi_L + \psi_d)}{P} \quad (2.96)$$

## 2.5 Análisis Termoeconómico del Sistema.

Tabla 2.28 Costo del Combustible en la Instalación en el 2016

	\$/MWh	\$/MWaño	\$/kWh
Costo	64,52	565195,2	0,06452
	g/kWh	kg/kWh	kg/kWs
Consumo específico	238,6	0,2386	6,62778E-05
	\$/HL	\$/m <sup>3</sup>	\$/kg
Precio del combustible	24,1421	241,421	0,243810341
Densidad del combustible	990,2	kg/ m <sup>3</sup>	
Poder calorífico Inferior	37932,408	kJ/kg	
Consumo en kJ	9050,672549	kJ / kWh	
Costo en kJ= c <sub>F</sub>	6,42749E-06	\$/kJ	

Datos de cálculos para la valoración económica

K<sub>i</sub>= coste unitario por bloque del sistema

$$k_i = (\psi_F / \psi_P) = 1 / \eta_{\beta} \quad (2.97)$$

$C_{\psi^d}$  = consumo exergético de la exergía destruida (costo de operación exergético)

$$C_{\psi^d} = \psi_d * K_i \quad (2.98)$$

$\Pi_{Ep}$  = coste exergoeconómico; [\$/h]

$$\pi_{Ep} * \beta_P = C_F * \beta_F + Z \quad (2.99)$$

$C_{\psi D_{ef}}$  = coste de la exergía destruida (costo de operación exergoeconómico)

$$C_{\psi D_{ef}} = (\psi_d * c_f); [$/s] \quad (2.100)$$

$$C_{\psi D_{ef}} = (\psi_d * c_f * 3600); [$/h] \quad (2.101)$$

Tabla 2.29 Parámetros de coste exergético y coste de exergía destruida.

	Coste de la exergía destruida $c_F = 6,42749E-06; \$/kJ$		Consumo exergético
	$C_{\psi D_{ef}}$		$C_{\psi^d}$
	[\$/s]	[\$/h]	[kW]
A	1,34	4825,391343	295256,8972
B	0,29	1037,766935	84522,41158
C	0,69	2493,748071	158655,2472
D	0,08	270,1964987	16952,13175
E	0,08	304,3692724	16802,96432
AE	2,48	8931,47212	808975,7244

### 2.5.1 Coste Exergético del Fuel y Producto

Datos de cálculos para la valoración

$K_F^*$  = coste unitario del fuel (recurso)

$$K_F^* = (\psi_F^* / \psi_F) \quad (2.102)$$

$K_P^*$  = coste unitario del producto

$$K_P^* = (\psi_P^* / \psi_P) \quad (2.103)$$

$$K_P = K_F^* [1 + ((I + \psi_d) / (\psi_P))] \quad (2.104)$$

$K_\eta^*$  = eficiencia exergetica

$$K_\eta^* = (K_F^* / K_P^*) \quad (2.105)$$

$K_r^*$  = incremento de coste en un equipo

$$K_r^* = (K_P^* - K_F^*) \quad (2.106)$$

Balance Exergetico

$$K_P^* \psi_P = K_F^* [\psi_P + I + \psi_d] \quad (2.107)$$

Tabla 2.30 Coste Exergetico unitario del Fuel y Producto

	Coste Exergetico unitario Fuel y Producto		Rendimiento Exergetico
	$K_f$	$K_p$	$Kn$
			<i>adimensional</i>
<i>A</i>	<i>1</i>	<i>1,41583199</i>	<i>0,706298492</i>
<i>B</i>	<i>1,029071741</i>	<i>1,939375537</i>	<i>0,530620151</i>
<i>C</i>	<i>1,029071741</i>	<i>1,514927068</i>	<i>0,679287976</i>
<i>D</i>	<i>1,029071741</i>	<i>1,493944503</i>	<i>0,688828627</i>
<i>E</i>	<i>1,029071741</i>	<i>1,314543498</i>	<i>0,782835823</i>
<i>AE</i>	<i>1,029071741</i>	<i>2,156762408</i>	<i>0,477137276</i>

Tabla 2.31 Coste Exergético e Incremento del coste del Equipo.

	Coste Exergético de Fuel y Producto (Balance Exergético)		Incremento del coste del Equipo	Exergía Destruída
	$\Psi^*_{recurso}$	$\Psi^*_{producto}$	$K_r$	$(\Psi_P * k_r) / K_f$
	(kW)	(kW)	Adimensional	(kW)
A	710038,92	710038,92	0,41583199	208539,5013
B	98410,15916	98410,15916	0,910303796	44849,29483
C	345810,978	345810,978	0,485855327	107772,6017
D	38617,26602	38617,26602	0,464872761	11677,11365
E	62332,43053	62332,43053	0,285471757	13153,9624
AE	759690,6974	759690,6974	1,127690667	385992,4738

### 2.5.2 Coste exergoeconómico unitario del Fuel y Producto

Datos de cálculos para la valoración económica

$C_F$  = coste unitario exergoeconómico del fuel

$$c_P = (\pi_P / \psi_P) = (\pi_F + z) / \psi_P \quad (2.108)$$

$C_P$  = coste unitario exergoeconómico del producto

$$c_{F_i} (\pi_{F_i} / \psi_{F_i}) \quad (2.109)$$

### 2.5.3 Coste exergoeconómico del Fuel y Producto

$\Pi_F$  = coste exergoeconómico del recurso

$\Pi_P$  = coste exergoeconómico del producto

$$\pi_P = (\pi_F + Z_I) \quad (2.110)$$

$$\pi_F = (c_F * \psi_F) = (K_i * c_F * \psi_P) = c_F * (\psi_P + \psi_d) \quad (2.111)$$

Tabla 2.32 Coste Exergoeconómico del Fuel y Producto

	Coste Exergético unitario	Coste Exergoeconómico [\$/s]		coste exergoeconómico unitario	
		$\Pi$ precurso	$\Pi$ producto	$c_F$ ; [\$/kJ]	$c_p$ ; [\$/kJ]
	$K_i$				
A	1,42	4,563771207	5,004369293	6,42749E-06	9,97881E-06
B	1,88	0,614147782	1,054745868		2,08033E-05
C	1,47	2,159905911	2,178913789		9,54538E-06
D	1,45	0,241200154	0,263030269		1,01756E-05
E	1,28	0,389323051	0,411153166		8,67091E-06
AE	2,10	4,744963383	5,814356228		1,6507E-05

#### 2.5.4 Factor Exergoeconómico de los Sistemas.

$Z_i$  = coste del equipo por unidad de tiempo; \$ / s

$Z_{Ep}$  = coste total del equipo; \$

$f_i$  = Factor exergoeconómico, adimensional

$$Z_i = ((1 + a_i) * \phi * Z_{Ep} ) / (N * 3600 ) \quad (2.112)$$

$$a_i = (i * (1 + i)^n) / ((1 + i)^n - 1) \quad (2.113)$$

$$f_i = ((Z_i) / (Z + c_{Fi} * (\psi_d + L))) \quad (2.114)$$

TABLA 2.33 FACTORES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

$i$	Factor de amortización de la Inv. = 6%	0,06
$\phi$	Factor de operación y Mtto	1,05
$n$	Tiempo de vida de la Inversión en años	28
$N$	Horas de funcionamiento en años	8760

Tabla 2.34 Factor Exergoeconómico de los Sistemas

Bloque.	Equipos 0 Sistemas	$Z_{Ep}; [\$]$	$a_i$	$Z_i; [$/s]$
Cámara	E + F	12314480,3	0,07459252	0,440598086
Horno				0,440598086
Sobrecalentador	G	531260		0,019007878
Economizador	H	610140		0,021830115
Recalentador	J	610140		0,021830115
Sistema	K	29888956,7		1,069392845

Tabla 2.34a. Factor Exergoeconómico de los Sistemas

Bloque.	Coste exergoeconómico del Equipo ;[\$/s]	Factor exergoeconómico (adimensional)
	$(Z_i + C\psi D_{ef})$	$f_i$
Cámara	1,78	0,247390
Horno	0,73	0,604498
Sobrecalentador	0,71	0,026707
Economizador	0,10	0,225321
Recalentador	0,11	0,205214
Sistema	3,55	0,301207
Factor exergoeconómico		
$f_i = ((Z_i)/(Z_i + C\psi D_{ef}))$		

Tabla 2.35 Sobrecoste Relativo

$\lambda_i = (c_p - c_F) / c_F$	
<i>A</i>	0,55
<i>B</i>	2,24
<i>C</i>	0,49
<i>D</i>	0,58
<i>E</i>	0,35
<i>AE</i>	1,57

$$\lambda_i = (k_i - 1) + (z_i / (c_F * \psi_p)) \quad (2.115)$$

### CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza una representación gráfica de los parámetros obtenidos durante la evaluación de la estructura funcional, donde se puede apreciar con gran claridad el comportamiento de las diferentes variables que determina la eficiencia de los sistemas evaluados, caracterizando su funcionalidad, dando una imagen de que ocurre con la calidad de la energía, identificando las zonas donde se encuentran las mayores mal funciones del sistema

#### 3.1 Representación Gráfica de los Parámetros Termodinámicos y Exergoeconómicos.

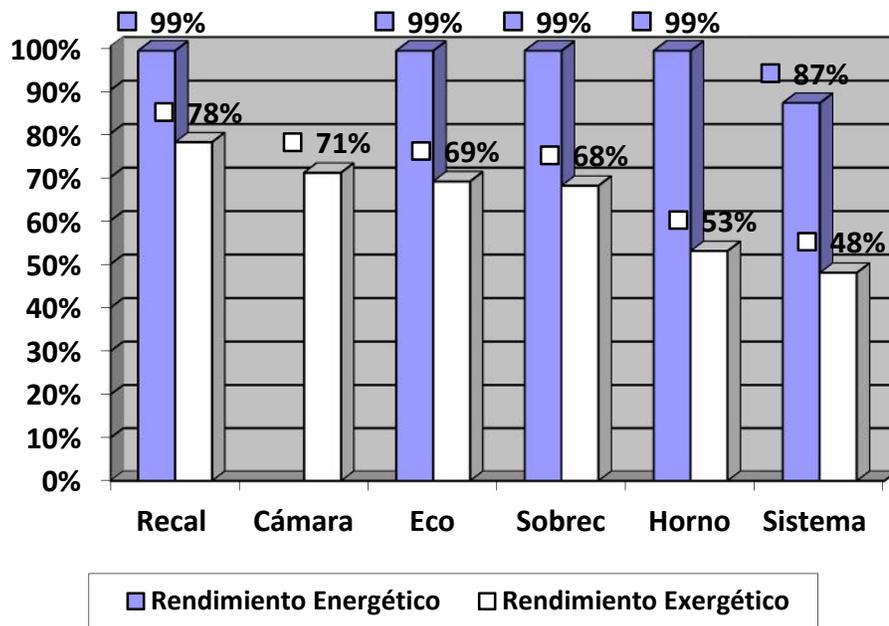


Figura 2.1 Comportamiento de los rendimientos en %

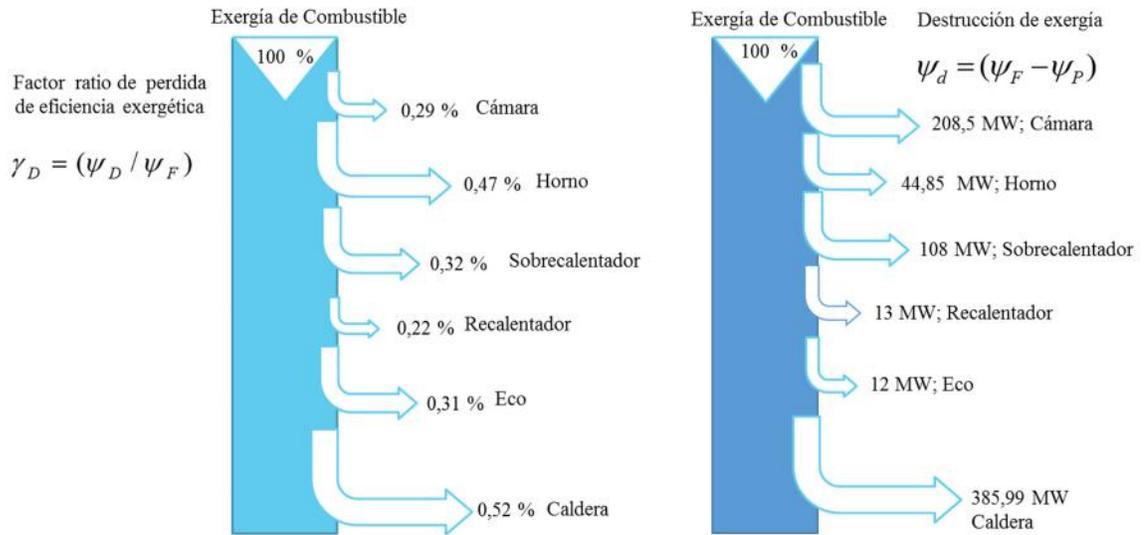


Figura 2.2 Pérdidas de eficiencia exergética y Destrucción de exergía.

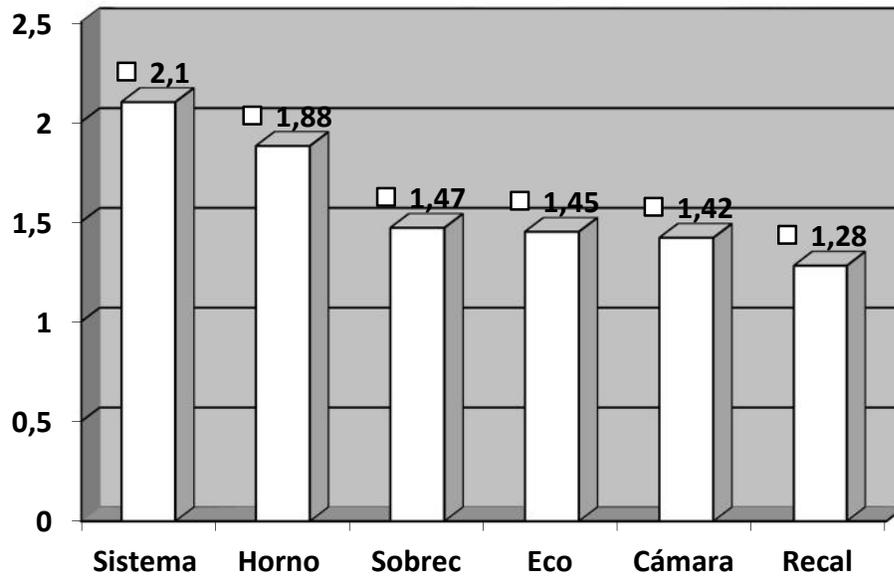


Figura 2.3 Comportamiento del coste exergético unitario.

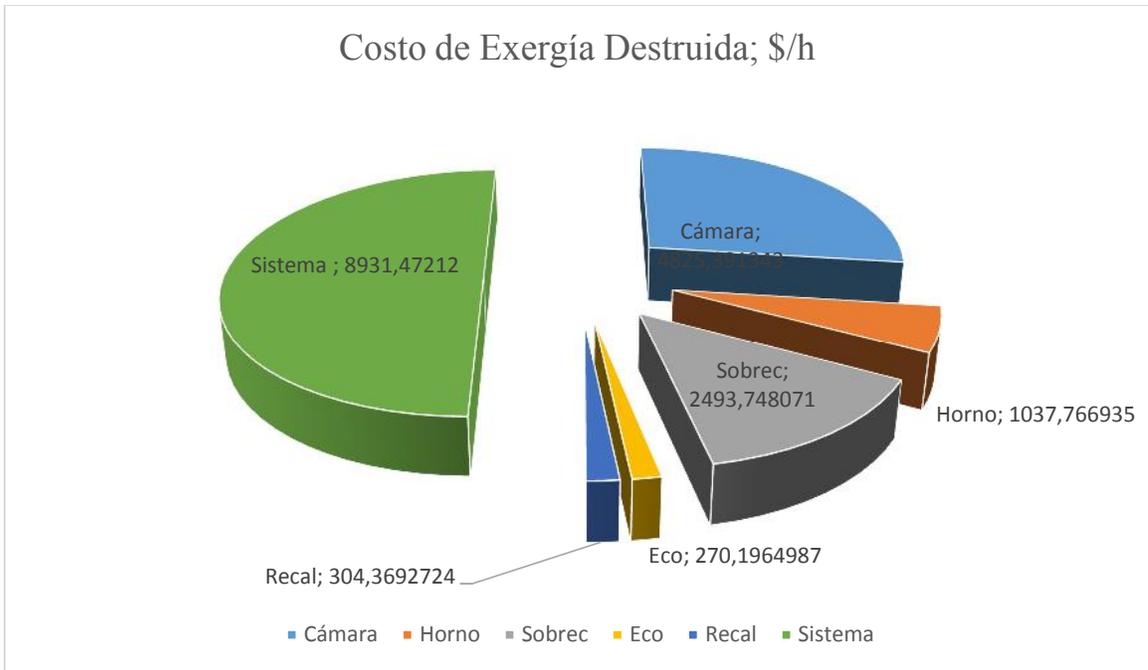


Figura 2.4 Costos de la Exergía Destruída de los Equipos en \$/h.

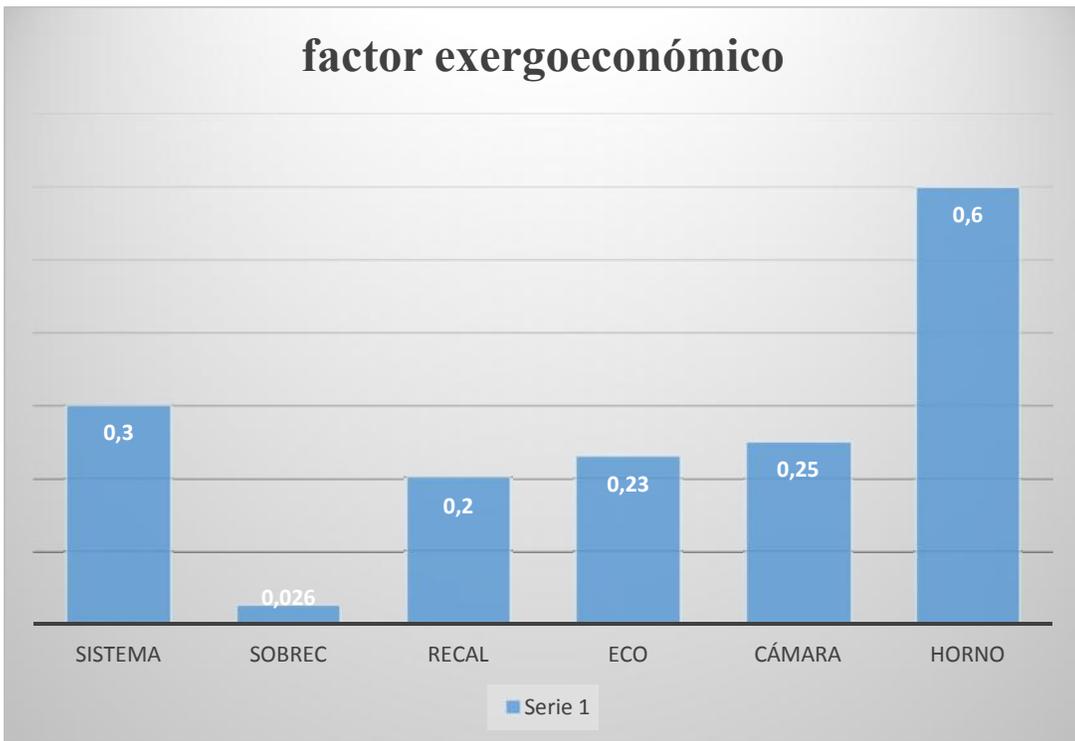
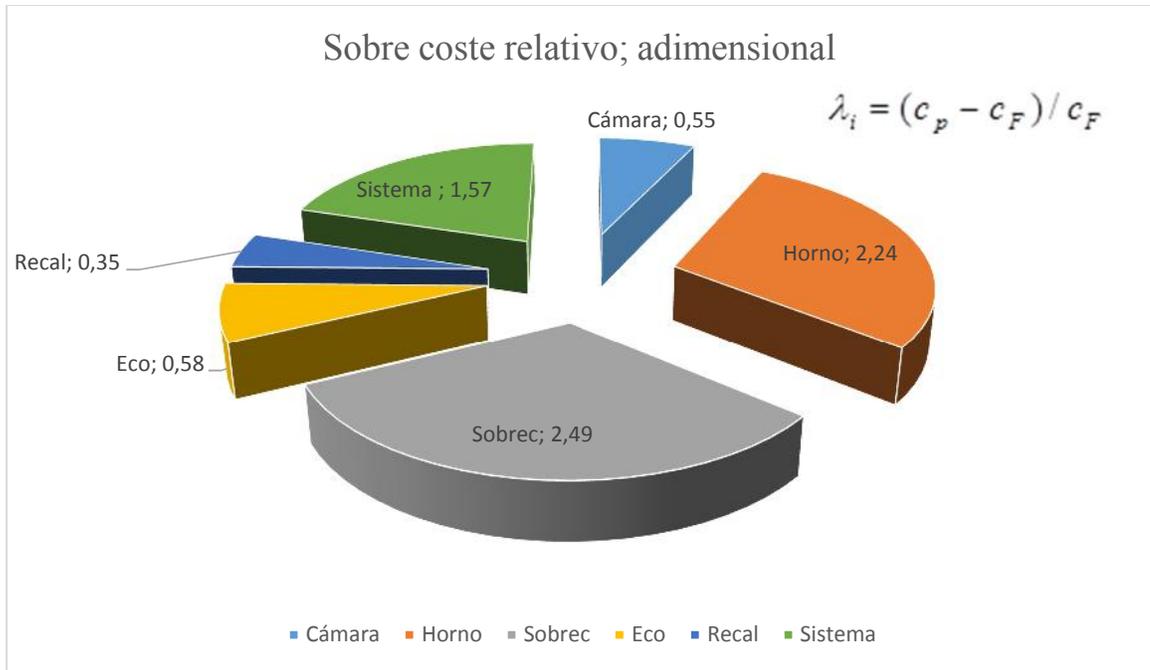
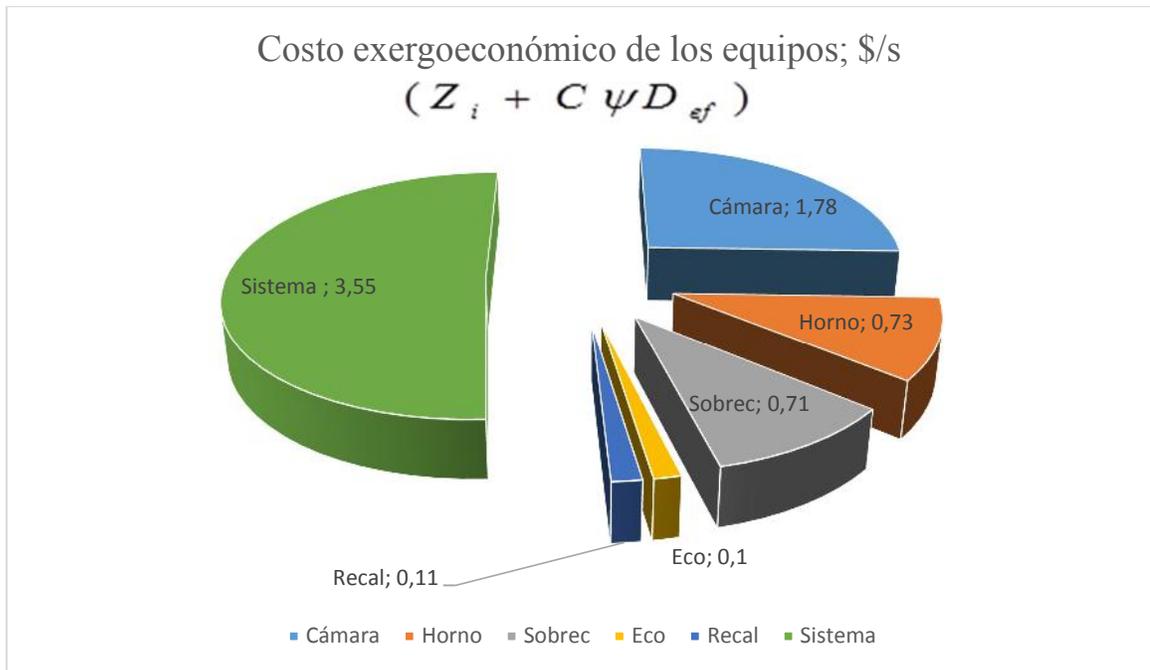


Figura 2.5 Factor Exergoeconómico por Equipo.



*Figura 2.6 Sobrecoste relativo.*



*Figura 2.7 Sobrecoste.*

## CONCLUSIONES

1. El estudio desarrollado muestra la aplicación práctica y los beneficios que aporta el análisis termoeconómico sobre el análisis basado por la Norma ASME PTC.4.1. aplicado en la caldera de la central térmica Antonio Guiteras, donde en el mismo se puede apreciar el comportamiento de la exergía en cada uno de los componentes del sistema, permitiendo conocer el impacto que tienen los flujos de energías que salen del proceso sin ningún aprovechamiento.
2. Con la aplicación del trabajo se logra:
  - Cuantificar mediante el coeficiente de ineficiencia ( $Y_d$ ) el porcentaje de la exergía total suministrada al sistema que se destruye en cada equipo, identificando el equipo que más exergía destruye, siendo el horno y los sobrecalentadores
  - Se logra visualizar las fuentes reales de costo en los diferentes componentes del sistema, caracterizando el costo de capital y las ineficiencias termodinámicas del sistema expresadas como la destrucción de exergía con la valorización del diferencial de relativo de coste ( $Y_k$ ).
  - Cuantifica la cantidad de dinero que proporciona como gasto las irreversibilidades de los equipos y del sistema, siendo mayores en el horno con 4825,4 \$/h y los sobrecalentadores con 2493,7 \$/h
  - Proporciona la ubicación de la zona, equipo o sistemas donde ocurren las malas funciones, identificando a la cámara de combustión y los sobrecalentadores
  - Proporciona un coeficiente de valoración de desempeño mediante el factor exergoeconómico ( $f_i$ ), que nos permite reflexionar en acciones de mantenimiento o de posibles sustituciones para obtener una mejor eficiencia en el proceso productivo. En este caso dado los bajos valores de este factor  $f_i$  se debe considerar la reparación capital del GV o un replazo de esta tecnología.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Comenzar la optimización del sistema por los equipos que más energías destruyen durante el proceso.
- ✓ Analizar la implementación en la central térmica Antonio Guiteras del estudio termoeconómico como pre – evaluación del comportamiento de los sistema en el proceso productivo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anazoi A N (2012) The Influence of Throughput on thermodynamic Efficiencies of a Thermal Power Plant. (International Journal of Energy Engineering), pp.266-272
- Angélica Karina (2011) Tesis Doctoral. Aplicación de Análisis Exergético para la Evaluación de Procesos de Producción de Bieotanol de Segunda Generación
- Babu G Buchi and Dr. Sridhan (2012) Comparative Exergy and Analysis of Thermal Power Plant., International Conference on challenges and Opportunities' in Mechanical Engineering., Industrial Engineering and Management Studies.pp.618-626
- Bastidas Barranco (2010) Análisis Multioobjetivo para la Optimización en Sistemas de Generación de Energía, tesis doctoral, universidad nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.
- Bosch José Fernando (2007) Modelo Termo Económico de una Central Térmica de Ciclo Combinado, tesis de maestría, universidad: Pontifica Bolivariana, Medellín.
- Brown J (2015) Advanced Exergy and Exergoeconomic Analysis of the Major Components Combined Cycle Power Plant.
- Carrillo, (2007) Enfoque Exergético para la Optimización del uso de la energía en la Industria. Revista ION, Vol.20. No.1, pp18-25.Universidad Industrial de Santander .Bucaramanga. Colombia.
- Dang Rakesh (2016) Exergoeconomic Analysis of 600 MW Thermal Power Plant. (SSRJ International Journal of Thermal Engineering (SSRJ-ITJE).Volume. 2
- Ellakany Farid (2015) Thesis Master: Enhancing the Thermo-economic Performance of a Direct Steam Generation Solar Tower through the Implementation of Steam Flow Control Strategies for Flexible Operation.

- Geet (2014) Exergy Analysis for 120 mw Thermal Power Plant with Different Inlet Temperature Conditions: International Journal of Research in Engineering & Technology. Volumen.2, pp.21-30.
- Gulhane Sarang (2013) Exergy Analysis of Boiler in Cogeneration Thermal Power Plant. (INSS: 2330-0847)
- Hajabdollani Zahra, Hassan Hajabdollani (2017) 4E Analysis and Multi-Objective Optimization of gas Turbine CCHP plant with variable ambient Temperature; Department of Energy and Power Engineering ,HUST University ,Wuhan ,China ; Energy Equipment and Systems.Vol5 .No.3 ,pp285-298
- Hasti Sandhya (2013) Thesis Master: Exergy Analysis of Pulverized Coal –Fired Supercritical Power Plants. (University of Regina)
- Hitendra, (2015) Energy and Exergy Analysis of Thermal Power Plan: A case study of DCM Shriram Lcd. International Journal for Scientific Research and Development: Vol.3 .ISSN (on line):2331-0613
- Hurtado Vanessa (2014) Valoración Exergética de los Sistemas de Vapor, Una Herramienta Informática Aplicada en el marco de la Gestión Energética.
- Kenya (2005) Exergy Analysis of OLKARIA I Power Plant. (IS-108 .Reykjavík, Iceland)
- Kulkarni (2014) Energy and Exergy Analysis of Coal Fired Power Plant (ISSN: 2321-1156)
- Kumar Krishna., Dharmendra Patel (2013) Performance and Exergy Analysis of the Boiler. International Journal of Science and Research.ISSN (Online):2319-7064, pp.3011-3015.
- Larrotta Silva (2015) La Termoeconomía como Alternativa para mejorar la Competitividad Industrial, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá.

- Lozano Miguel (1997) *Aplicaciones Termoeconómicas del Método Exergético*
- Marcela (2010) Tesis de Maestría: Análisis del Costo Exergético en una Planta Termoeléctrica. (Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudio de Posgrado e Investigación Profesional Adolfo López Mateos, ciudad México)
- Mechi Salari., Vonsough Amir (2012) Effect of Ambient Temperature to Power Plan Efficiency; 2<sup>nd</sup> International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering (ICMPAE).Singapore.
- Mitra Soupayan (2015) Application of Exergy and Toguchi Methodology for a Power Plant under Varying Operating Conditions. (ISSN 2248 9622).Vol.5, pp.25-31
- More S (2014) Thermal Analysis of Energy in Exergy of Back Pressure Steam Turbine in Sugar Cogeneration Plant. (ISSN 2250-2459), ISSO 9001:2008.Certified Journal, Volumen.4, pp.674-682.
- Naik Jyothu. (2012) *Exergy Analysis of 4, 5 mw Biomass Based Steam Power Plant.* (IOSR Journal of Humanities and Social Science (IOSRJHSS).ISSN:2279-0845 Volumen1, pp.01-04.
- Núñez Bosch (2016) Análisis Exergético de una Central Térmica de Cogeneración (Revista Azúcar).Volumen.43.
- Rojas Silvia (2007) Análisis Exergético Termoeconómico y Ambiental de un Sistema de Generación de Energía Caso de Estudio: USINA Termoeléctrica UTE-Rio Madeira. (Publicado: DM-109).
- Rostamzadeh Hadi, Hadi Ghaebi (2017) Theoretical Analysis of a novel Combined Cooling Heating ,and Power (CCHP) Cycle , Department of Aerospace Engineering Sharif University of Thnology,Tehran..Energy Equip Sys .Vol.5.No 3, pp. 241- 249
- Salazar Zamora. (2009) Análisis Exergético de una Central Termoeléctrica .Red de Revista Científica de América Latina y el Caribe .Vol. 13.No 1, pp17-25. México

- Sanjay Mali (2012) *Easy Method of Exergy Analysis for Thermal Power Plant International Journal of Advanced Engineering Research and studies. EISSN 2249-8974, pp.245-247*
- Shafiq Umar (2015) Thermodynamic Analysis of Natural Gas Based Furnace /Boiler Integrated with Steam Power Plant theoretical Approach. (ISSN 2231-606x)Volumen 5(12).
- Taghavi, M., Abdollahi, M., and Salehi, G., (2013) Thermodynamic and Thermo Economic Optimization of Combined Cycle Power Plant. (International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing).Volume.1, N0.2, pp1-11
- Torres (2016) Estudios Exergoeconómico de Factibilidad a una Planta Térmica de Cogeneración. (Universidad Autónoma Metropolitana –Iztapalapa .Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial, México, (VI Simposio Internacional de Energía)
- Tumen ( 2010 ) Exrgoeconomic Analysis of A FBBC Steam Power Plant.(Department of Mechanical Engineering ,Adama Science and Technology University,Adama ,Turkey
- Verman Yamani .,Kalpit P.Kaurase.(2014).,Exergy y Analysis of Thermal Power Plant .,International Journal of Engineering and Sciences Research.ISSN-2277-2685.Vo.1.4,pp.940-945.
- Wang Ligang (2012) Advanced Thermodynamic Analysis and Evaluation of a Supercritical Power Plant. (ISSN 1996 1073)
- Xiong Jie, Haibo Zhao (2017) Thermodynamic Operation Optimization of a Coal –Fired Power Plant. (Journal Homepage.Energy, pp. 486 – 496)
- Yousefi Hussein, Mohammad Hasan (2017) Determining the Optimal Size of a Ground Source Heat pump within an – air conditioning system economic and emission considerations., Faculty of New Sciences and Technologies University Tehran. Energy Equip Sys .Vol.5, pp219 – 226

## ANEXOS.1.1

### Índices de Tablas

Tabla 1.1 Emisiones máximas admisibles en Centrales Térmicas .....	19
Tabla 1.2 Período de Modelación y Valores de Referencias de Emisiones .....	19
Tabla 2.1 Datos de Entrada para la Combustión y Estimaciones de Emisiones .....	23
Tabla 2.2 Números de moles teóricos.....	27
Tabla 2.3 Números de moles reales .....	27
Tabla 2.4 Fracciones molares .....	28
Tabla 2.5 Concentraciones Medias de las Emisiones de Contaminantes en un día.....	30
Tabla 2.6 Resultados de las Emisiones Contaminantes .....	31
Tabla 2.7 Balance por Método Directo o de Pérdidas .....	32
Tabla 2.8 Parámetros Ambientales y Referencias .....	34
Tabla 2.9 Parámetros Ambiente Flujo Agua –Vapor .....	35
Tabla 2.10 Parámetros Ambiente para Gases .....	35
Tabla 2.11 Interpolación calor específico del aire atmosférico .....	36
Tabla 2.12 Interpolación calor específico aire de combustión .....	36
Tabla 2.13 Definición de Bloques del Proceso .....	36
Tabla 2.14 Definición de Recursos y Productos .....	37
Tabla 2.15 Costo unitario exergético .....	37°
Tabla 2.16 Corrientes Termodinámicas del Proceso .....	38
Tabla 2.17 Datos de Entrada Cámara de Combustión .....	39
Tabla 2.18 Datos de Entrada Horno.....	41
Tabla 2.19 Datos de Entrada Sobrecalentadores.....	44
Tabla 2.20 Datos de Entrada Economizador.....	46
Tabla 2.21 Datos de Entrada Recalentadores .....	48
Tabla 2.22 Propiedades Termodinámicas Flujo Agua –Vapor .....	50
Tabla 2.23 Calores específicos obtenidos.....	50
Tabla 2.24 Propiedades Termodinámicas (Flujo Gases) .....	51
Tabla 2.25 Rendimiento Energético .....	51
Tabla 2.26 Destrucción de Exergía y Ratio de exergía.....	52
Tabla 2.27 Rendimiento Exergético y Coste unitario exergético .....	52
Tabla 2.28 Costo del Combustible.....	53
Tabla 2.29 Parámetros de Coste Exergético y Coste de Exergía Destruída .....	54
Tabla 2.30 Coste Exergético Unitario del Fuel y Producto .....	55
Tabla 2.31 Coste Exergético e Incremento del Coste del Equipo.....	56
Tabla 2.32 Coste Exergético Económico del Fuel y Producto .....	57
Tabla 2.33 Factores de Operación y Mantenimiento .....	57
Tabla 2.34 Factores Exergoeconómico de los Sistemas .....	58
Tabla 2.34a Factores Exergoeconómico de los Sistemas .....	58
Tabla 2.35 Sobrecoste Relativo .....	59

## ANEXOS.1.2

### Figuras y Gráficas.

Figura 1.1 Volumen de Control del Sistema.....	33
Figura 1.2 Estructura Funcional .....	34
Gráfica 2.1 Comportamiento del Rendimiento Energético y Exergético .....	60
Gráfica 2.2 Pérdida de eficiencia exergética y Destrucción de exergía .....	61
Gráfica 2.3 Comportamiento del Coste Exergético unitario .....	61
Gráfica 2.4 Coste de la Exergía Destruída.....	62
Gráfica 2.5 Factor Exergoeconómico .....	62
Gráfica 2.6 Sobrecoste Relativo .....	63
Gráfica 2.7 Sobrecoste .....	63

## ANEXOS.1.3

### Cálculo de los Calores Específicos.

Para obtener los valores de los calores específicos de cada corriente teniendo presente la temperatura de análisis en cada recinto de forma general se emplean las ecuaciones tabuladas en el Libro de Termodinámica; Virgil Moring Faires, (Primera reimpresión 1981) .p.66)

Donde:

Para Aire; [cal / kg K]\*4,1816 = [kJ/kg K] (Rango de temperatura 280 a 1500 K)

$$C_{p\text{aire}} = \left( 0,219 + \frac{0,616 * T}{10^4} - \frac{0,949 * T^2}{10^8} \right) * 4,1816$$

Para el Agua; [cal / kg K]\*4,1816= [kJ/kg K] (Rango de temperatura 300 a 3000 K)

$$C_{p\text{agua}} = \left( 1,102 - \frac{24,6}{(T)^{0,5}} + \frac{231}{T} \right) * 4,1816$$

\*El Cp. aire se obtiene por datos tabulados del Cp. del Aire atmosférico

### Para Gases

Dióxido de Carbono; [cal / mol K] (Rango de temperatura 300 a 5000 K)

[cal /kmol K]\*4, 1816 = [kJ/kmol K]

$$C_{p\text{co}} = \left( 9,46 - \frac{1829}{T} + \frac{33,1 * 10^1}{(T)^2} \right) * 4,1816$$

Anhídrido Carbónico; [cal / kmol K] (Rango de temperatura 300 a 3500 K)

$$C_{pcO_2} = \left( 16,2 - \frac{3630}{T} + \frac{43,6 * 10^4}{(T)^2} \right) * 4,1816$$

Agua; [cal / kmol K] (Rango de temperatura 300 a 3000 K)

$$C_{pagua} = \left( 19,08 - \frac{445}{(T)^{0,5}} + \frac{4167}{T} \right) * 4,1816$$

Nitrógeno; [cal / kmol K] (Rango de temperatura 300 a 5000 K)

$$C_{pn_2} = \left( 9,47 - \frac{1929}{T} + \frac{35,8 * 10^4}{(T)^2} \right) * 4,1816$$

Oxígeno; [cal / kmol K] (Rango de temperatura 300 a 2800 K)

$$C_{pO_2} = \left( 11,515 - \frac{128}{(T)^{0,5}} + \frac{850}{T} \right) * 4,1816$$

Anhídrido Sulfuroso; [cal / kmol K] (Rango de temperatura 300 a 1900 K)

$$C_{pSO_2} = \left( 11,89 + \frac{17,9 * T}{10^4} - \frac{26,5 * 10^4}{(T)^2} \right) * 4,1816$$

Interpolación Aire Atmosférico; Ambiente de Referencia

T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	C <sub>p2</sub>	C <sub>p1</sub>	C <sub>paire</sub>
305, 5	300	350	1,009	1,007	1,00722