

**ESTUDIO NUMERICO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE UNA PLANTA
DE COGENERACION DE LA INDUSTRIA AZUCARERA**

INDIRA CAROLINA MADERO LUQUERNA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA INGENIERIA EN ENERGIA

BUCARAMANGA

2017

**ESTUDIO NUMERICO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR DE UNA PLANTA
DE COGENERACION DE LA INDUSTRIA AZUCARERA**

INDIRA CAROLINA MADERO LUQUERNA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA EN
ENERGIA**

Director

LEONARDO ESTEBAN PACHECO SANDOVAL (M.Sc., Ph.D)

Co-Director

Carlos Alirio Díaz González

Mario Jonatan Acero Caballero

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA INGENIERIA EN ENERGIA

BUCARAMANGA

2017

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Bucaramanga para optar el título de Ingeniera en Energía.

Firma del Director

Firma del Calificador

Bucaramanga, Mayo 30 de 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a mis padres, hermanos y mi familia que han sido el pilar fundamental de mi vida, gracias a ellos que desde un comienzo me estuvieron brindando su ayuda, apoyo y sobre todo confianza para poder seguir adelante y darle fin a esta etapa.

A mis compañeros con quienes comencé mi carrera y a quienes conocí en el transcurso de la misma, a todos los que me acompañaron durante todo mi proceso académico y quienes siempre confiaron en mis capacidades y me brindaron su amistad.

A todos los docentes, en especial a Leonardo Pacheco y Carlos Díaz que dieron lo mejor de sí mismos para transmitirnos los conocimientos y principios que harán de mí un excelente profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. OBJETIVOS.....	12
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2 OBJETIVO ESPECIFICO	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	13
3. MARCO CONCEPTUAL	14
3.1 CALDERA ACUOTUBULAR	14
3.2 EQUIPO DE COMBUSTIBLE.....	15
3.3 COMBUSTIBLE	16
3.4 CARBÓN	16
3.5 BAGAZO	17
3.6 SOBRECALENTADOR.....	18
3.7 RECALENTADOR	19
3.8 EVAPORADOR.....	19
3.9 ECONOMIZADOR	19
3.10 CALENTADOR DE AIRE.....	20
3.11 BALANCE ENERGÉTICO	20
3.12 ANÁLISIS EXERGÉTICO	20
3.13 IRREVERSIBILIDADES	21
3.14 ESQUEMA DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR.....	22
4. ESQUEMA GENERAL DE LA CALDERA BAGACERA.	24
4.1 ESQUEMA DE CÁLCULOS QUE SE REALIZO PARA EL PROYECTO ..	26
5. COMBUSTIÓN	27
5.1 COMBUSTIÓN ideal.....	27
5.2 RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE.....	29
5.3 PODER CALORÍFICO Inferior	30
5.4 COMBUSTION REAL	32
6. BALANCE ENERGÉTICO.....	34
6.1 SUBSISTEMA INTERCAMBIADOR DE CALOR: EVAPORADOR	34
6.2 SUBSISTEMAS SOBRECALENTADORES I Y II.....	36

6.3	SUBSISTEMA CALENTADOR DE AIRE SOBREFUEGO.....	39
6.4	SUBSISTEMA: CALENTADOR DE AIRE FORZADO.....	41
6.5	SUBSISTEMA ECONOMIZADOR.....	42
6.6	SUBSISTEMA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	44
7.	EFICIENCIA.....	47
8.	ANÁLISIS EXEGÉTICO	49
8.1	EXERGÍA QUÍMICA	49
8.2	EXERGÍA DE PRODUCTOS	50
8.3	ENERGÍA FÍSICA	52
	ENERGÍA DESTRUIDA.....	53
9.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	55
9.1	PRECIO DEL CARBÓN	55
9.2	DEL BAGAZO	56
10.	ANÁLISIS AMBIENTAL	59
	BIBLIOGRAFIA.....	63
	ANEXOS	65
	ANEXO A. ANÁLISIS de COMBUSTIÓN dela caldera acuotubular	65
	ANEXO B. balance energetico de la caldera acuotubular	68
	ANEXO C. eficiencia dela caldera acuotubular	70
	ANEXO D. balance exergetico de la caldera acuotubular	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema general del funcionamiento de una caldera acuotubular adaptado de [1].....	14
Figura 2 Ejemplo de una caldera acuotubular, adaptado de [2].....	15
Figura 3 Esquema de la obtención del bagazo adaptado de [4]	18
Figura 4 Diagrama de cambio de un sistema adaptado de [8].....	22
Figura 5 Esquema de caldera acuotubular adaptado de [7].....	22
Figura 6 Esquema general de la caldera bagacera, adaptado de [6]	24
Figura 7 Esquema de cálculo de proyecto	26
Figura 8 Mezcla de Combustible vs Poder calorífico.....	32
Figura 9 Intercambiador de calor	35
Figura 10 Sobrecalentador II	37
Figura 11 Sobrecalentador I	38
Figura 12 Calentador de aire sobrefuego.....	40
Figura 13 Calentador de aire primario.....	41
Figura 14 Economizador	43
Figura 15 Cámara de combustión	44
Figura 16 Mezcla de combustible vs flujo	46
Figura 17 Eficiencia vs Mezcla de combustible	48
Figura 18 Exergía destruida vs mezcla de combustible	54
Figura 19 Precio del carbón [12].....	56
Figura 20 Precio del carbón vs tiempo [13].....	56
Figura 21 Precio del bagazo adaptado de [14]	57
Figura 22 Mezcla de combustible vs precio por kg de combustible	58
Figura 23 Mezcla de combustible vs Costo de producción mes	58
Figura 24 Mezcla de Combustible vs Contaminantes.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de exergía	21
Tabla 2 Descripción de las partes de la caldera acuotubular [7].....	23
Tabla 3 Características de la caldera acuotubular adaptado de [6]	25
Tabla 4 Composición de combustible.....	27
Tabla 5 Coeficientes del balance de la combustión ideal	28
Tabla 6 Moles producto de la combustión.....	28
Tabla 7 Relación aire-Combustible.....	30
Tabla 8 Poder calorífico del combustible	31
Tabla 9 Coeficientes de la combustión Real	33
Tabla 10 Moles producto de la combustión.....	33
Tabla 11 Datos del evaporador	35
Tabla 12 Datos del sobrecalentador 2.....	37
Tabla 13 Datos del sobrecalentador 1.....	38
Tabla 14 Datos del calentador de aire sobrefuego	40
Tabla 15 Datos del calentador de aire forzado	41
Tabla 16 Datos de economizador.....	43
Tabla 17 Datos de la cámara de combustión.....	44
Tabla 18 Flujo de combustible.....	45
Tabla 19 Eficiencia para cada tipo de mezcla.....	47
Tabla 20 Exergía Química de los Reactivos	50
Tabla 21 Exergía Química de productos	51
Tabla 22 Exergía Química total	52
Tabla 23 Exergía física en cada entrada y salida de subsistema	53
Tabla 24 Exergía destruida en subsistema	54
Tabla 25 Costo de producción del combustible	57
Tabla 26 Productos contaminantes del ambiente [15].....	59

NOMENCLATURA

C_{bagazo} :	Fracción molar de carbono en el bagazo
C_{carbon} :	Fracción molar de carbono en el carbón
X :	Moles de Dióxido de carbono
Y :	Moles de agua
Z :	Moles de nitrógeno
W :	Moles de dióxido de azufre
R :	Moles de monóxido de carbono
$H_{2bagazo}$:	Fracción molar de hidrógeno en el bagazo
$H_{2carbon}$:	Fracción molar de hidrogeno en el carbón
O_{bagazo} :	Fracción molar de oxígeno en el bagazo
H_2O_{bagazo} :	Fracción molar de agua en el bagazo
H_2O_{carbon} :	Fracción molar de agua en el carbón
$N_{2carbon}$:	Fracción molar de nitrógeno en el carbón
S_{carbon} :	Fracción molar de azufre en el carbón
M_{comb} :	Moles de combustible
AC_t :	Relación aire combustible teórico
h :	Entalpia
PC :	Poder calorífico
m_{agua_M} :	Flujo de agua de la mezcla
m_{gases_M} :	Flujo de gases de la mezcla
m_{purga_M} :	Flujo de purga de agua
h_M :	Entalpia de la mezcla
$m_{aire_{primario}}$:	Flujo de aire primario
$m_{aire_{secundario}}$:	Flujo de aire secundario

ε :	Exergía
$\varepsilon_{Q_{\text{Reactivos}}}$:	Exergía química en los reactivos
$\varepsilon_{Q_{\text{productos}}}$:	Exergía química de los productos
x_i :	Fracción molar del compuesto
R:	Contante de los gases ideales
T_o :	Temperatura inicial
$\varepsilon_{Q_{\text{TOTAL}}}$:	Exergía química total
E_F :	Exergía física
S:	Entropía
η_{caldera} :	Eficiencia de la caldera
$P_{\text{util caldera}}$:	Potencia útil de la caldera
$P_{\text{termica caldera}}$:	Potencia térmica de la caldera

INTRODUCCIÓN

Actualmente la caldera es uno de los dispositivos más importantes y utilizados en la industria debido a que el vapor que produce este, puede ser utilizado para muchos procesos de producción en plantas o unidades de generación. Según estudios desarrollados, las calderas hacen parte de los principales equipos contaminantes del ambiente, debido a la implementación de combustibles fósiles, los cuales emiten material particulado al ambiente. Una caldera es un dispositivo utilizados para la producción de vapor mediante la aplicación de energía térmica para el agua. En la caldera, el fluido que está en estado líquido, aumenta su temperatura cambiando su fase a vapor saturado.

El análisis energético es una herramienta que tiene como objetivo determinar el lugar donde se está desperdiciando la energía y cuáles serían las inversiones que permitan un uso racional de esta, un análisis energético determina las áreas con mayor uso de energía.

Hoy día, uno de los principales desafíos que afronta la industria son los temas económicos y ambientales estando estos ligados al aumento del calentamiento global. Para las industrias es importante implementar estrategias que aumenten la sostenibilidad, demostrando la importancia de utilizar de forma eficiente los recursos energéticos: gas natural, petróleo, carbón, bagazo, entre otros. Para determinar la eficacia y eficiencia de cada sistema es necesaria la aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica. La energía no puede ser destruida, ya que se conserva en cada uno de los procesos.

Para este proyecto se realizó análisis energético, ambiental y económico de una caldera bagacera de un ingenio azucarero de la región del Valle del Cauca (Colombia), La caldera empleada en la planta de cogeneración tiene una capacidad de producción de 400.000 lb/h (181 Ton/h) de vapor sobrecalentado a 950 Psig y 955 °F. Esta caldera está diseñada para quemar bagazo, carbón o una mezcla de estos dos combustibles en las proporciones que la operación normal lo permita.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de una caldera acuotubular implementando bagazo, carbón y una mezcla carbón/bagazo para una planta de cogeneración de la industria azucarera.

1.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Desarrollar el modelo matemático de la caldera bagacera para el análisis de su comportamiento utilizando bagazo, carbón y una mezcla bagazo-carbón.
- Analizar la combustión de la caldera con los diferentes combustibles simulados.
- Estudiar el desempeño energético de la caldera utilizando diferentes combustibles.

2. JUSTIFICACIÓN

La caldera bagacera utilizada en el ingenio azucarero de la región del Valle del Cauca en una unidad productoras de vapor la cuales permite quemar una amplia gama de combustible con diferentes características, los más comunes son el carbón y los combustibles fibrosos como la caña de azúcar, para la producción de vapor. La caldera cuenta con 7 subsistemas que forman este generador de vapor:

- Cámara de combustión
- Intercambiador de calor, Hogar.
- Sobrecalentador primario
- Sobrecalentador secundario
- Calentador de aire sobrefuego
- Calentador de aire forzado
- Economizador

A lo largo de este proyecto se realizará un análisis de combustión para conocer el poder calorífico y eficiencia de cada uno de los combustibles. Una vez estos datos sean conocidos, se procederá a realizar el análisis energético de la caldera bagacera, en donde se encontrará la cantidad de combustible usado por la caldera y la cantidad de flujo necesario en cada uno de los subsistemas. Una vez se termine el análisis energético de todos los subsistemas dentro de la caldera acuatubular, se procederá a realizar el análisis exergético en donde se encontrarán los subsistemas con las mayores irreversibilidades y también se encontrarán cuales dispositivos son los que deberían ser revisados más seguido con el fin de disminuir las pérdidas exergéticas en la caldera. Finalmente se realizará un estudio económico de la caldera para cada una de las configuraciones que se realicen en la planta de cogeneración.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 CALDERA ACUOTUBULAR

Las calderas acuotubulares difieren del diseño de las calderas de calor en que los tubos contienen agua en lugar de gases de combustión. En una caldera acuotubular, los gases de combustión viajan sobre las superficies exteriores de los tubos y transfieren su calor al agua que contienen estos. Este tipo de caldera es empleada casi exclusivamente cuando se requieren obtener elevadas presiones y altos rendimientos, debido a los esfuerzos realizados en los tubos por las altas presiones, estas, se traducen en esfuerzos de tracción a lo largo de la red de tubería.

Este tipo de generadores de vapor son más simples debido no requieren el uso de bombas de circulación para su funcionamiento, esto las hace más fiables que las calderas de circulación forzada (que usan bombas). Estas calderas tienen presiones de funcionamiento limitadas. En la figura 1 se puede observar un diagrama general de una caldera acuotubular [1].

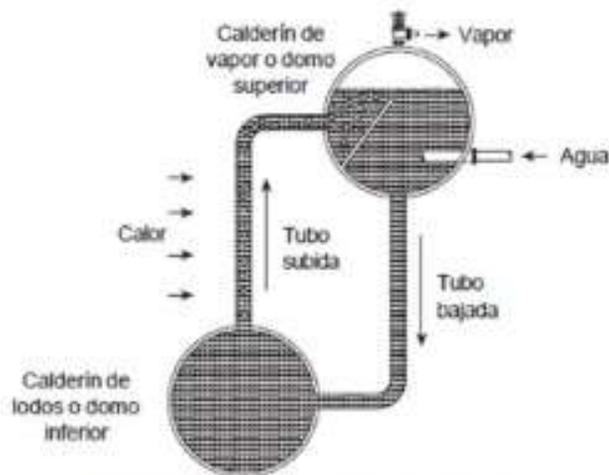


Figura 1 Esquema general del funcionamiento de una caldera acuotubular adaptado de [1]

3.2 EQUIPO DE COMBUSTIBLE

El equipo de combustible entrega el producto (combustible) al horno y provee el método de encendido. Los pulverizadores son incluidos como parte del equipo de combustible. Se resalta que el carbón pulverizado es el combustible más económico y más usado.

Existen diversos tipos de calderas acuotubulares, que varían según su forma de construcción y los equipos que poseen, en la figura 2 podemos observar un ejemplo de una caldera acuotubular en la cuales se describen algunas de las partes mencionadas anteriormente. Cabe resaltar que no todas las calderas poseen la misma cantidad de elementos y la misma distribución de los mismos. [1]

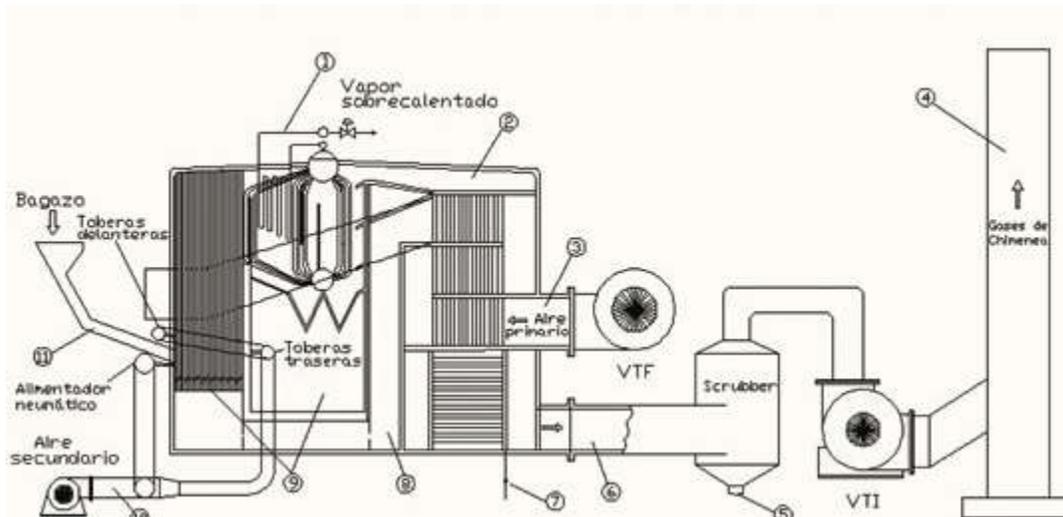


Figura 2 Ejemplo de una caldera acuotubular, adaptado de [2]

3.3 COMBUSTIBLE

Combustible es toda sustancia que puede quemarse con el fin de producir calor. Los combustibles pueden ser sólidos, líquidos y gases, ya sea en su estado natural o después de ser tratados.

- Combustibles sólidos: Carbones lignitos, coques, madera y residuos combustibles.
- Combustibles líquidos: Petróleo y sus destilados, no derivados del petróleo (rocas nitrosas y arenas de alquitrán).
- Combustibles gaseosos: gases naturales, gases fabricados (gases de petróleo, gases de aceite).

Los elementos básicos de un combustible son carbono e hidrogeno. El azufre también es un elemento que lo constituye, pero no se considera combustible. [2]

Es importante resaltar que tanto el carbón como el petróleo y el gas, se encuentran dentro de los llamados combustibles fósiles, los cuales representan a aquellos que se han formado hace millones de años en el planeta, a partir de restos orgánicos de animales muertos y plantas.

3.4 CARBÓN

El carbón es una mezcla de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, agua y cenizas. Nace de la conversión a través del tiempo de todas las formas de materia vegetal que existió, las cuales fueron quedando enterradas en pantanos. El carbón surgió mayoritariamente en el llamado Período Carbonífero, que finalizó hace cerca de 300 millones de años. Al utilizarse como combustible, el carbón puede emplearse para producir energía eléctrica, además de ser uno de los recursos más valiosos de la humanidad, como combustible y como fuente de productos químicos.

No es posible asignar una fórmula química definida al carbón, ya que es una forma natural que no posee una composición uniforme ni es una sustancia pura, es por eso que para conocer su composición se debe analizar químicamente [3].

Resumiendo, el proceso de combustión del carbón es cuando se pone el carbón en contacto con el O₂ y a una temperatura tal que el carbono se convierta en carbono fijo y volátil y así se consiga un buen contacto entre ambos.

Durante la reacción de combustión de un carbón es necesario regular los siguientes aspectos:

- Suministro de aire
- Tiempo de combustión
- Enfriamiento de gases de horno
- Granulometría

3.5 BAGAZO

Entre las fuentes renovables de energía, la más usada y antigua es la energía obtenida a partir de la biomasa, sobre la cual se realizan estudios para optimizar los procesos de combustión con el fin de alcanzar mayores rendimientos y eficiencias. Entre las plantas usadas para fines bioenergéticas se destaca la caña de azúcar, cuya eficiencia fotosintética es de las más altas entre todos los vegetales, razón por la cual la agroindustria azucarera es considerada una gran fuente de producción de energía. Como resultado de la molienda de la caña se obtiene el bagazo (figura 3), que es utilizado para autoabastecer a la industria energéticamente (potencia y calor en sistemas de cogeneración).

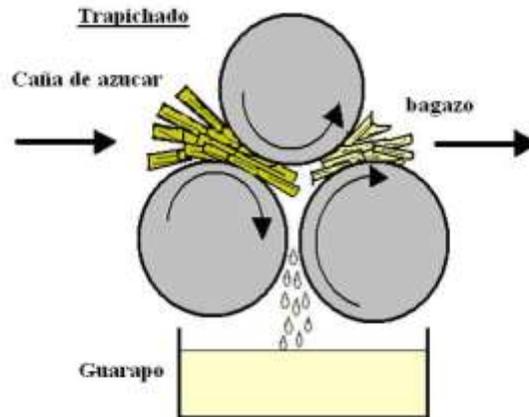


Figura 3 Esquema de la obtención del bagazo adaptado de [4]

El bagazo ha sido utilizado a través del tiempo como combustible en la industria azucarera, y aun cuando su valor calórico es relativamente bajo (1850 kCal/kg), al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, en algunos países que no tienen disponibilidad significativa de combustible y son grandes productores de caña de azúcar, el bagazo constituye un valioso potencial energético. En la actualidad se buscan esquemas energéticos y de procesos que aseguren la mayor cantidad de bagazo sobrante para la producción de derivados y, sobre todo, en los últimos años, para generar electricidad, que se aporta (se vende) a la red [4].

3.6 SOBRECALENTADOR

Cuando el vapor es requerido ya sea para generación de energía o para un proceso, a una temperatura más alta que su temperatura de saturación, es instalado el sobrecalentador. El vapor seco saturado es tomado del evaporador, conducido a través de la sección del sobrecalentador que consiste en un banco de tubos localizados en el horno exterior y calentados a la temperatura deseada. Usualmente se incorporan varias etapas de "sobrecalentador" asegurando minimizar la probabilidad de condensación del vapor en las siguientes etapas en una turbina de vapor. El proceso de "sobrecalentador" también incrementa la eficiencia total de la planta en turbinas de conducción. [4]

3.7 RECALENTADOR

El recalentador consiste en un banco de tubos localizados al interior del horno de salida, o en el alrededor de este horno. Se encarga de recalentar el vapor súper calentado arrojado por una etapa de presión con el fin de reducir aún más la posibilidad de condensación del vapor. El vapor recalentado es devuelto a las etapas restantes del proceso.

3.8 EVAPORADOR

El evaporador es la sección destinada a realizar el intercambio de calor con el fin de alcanzar la temperatura del vapor deseada, se trata por tanto de un intercambio de calor, que, en función de la capacidad requerida, necesita una determinada superficie de intercambio. El evaporador es el elemento que proporciona finalmente la temperatura necesaria para la conservación de los productos, mediante el cambio de estado de un determinado fluido refrigerante, a una presión y temperatura dadas. [4]

3.9 ECONOMIZADOR

El economizador es agregado al sistema de calderas para reducir la temperatura de los gases de combustión dejándolas a su menor valor posible, de este modo, minimizar el uso del combustible. El agua de alimentación que recorre a través del banco de tubos del economizador absorbe el calor de los gases de combustión, de esta forma, incrementan la temperatura del agua de alimentación antes de que ingrese al evaporador. [4]

3.10 CALENTADOR DE AIRE

El propósito de un calentador de aire es precalentar el aire de combustión de las borneras, incrementando la eficiencia de la combustión y ayudando en el proceso de quemado y pulverizado del carbón. El calor de los gases de combustión después de abandonar la sección del economizador y antes de entrar en el almacenamiento, Se reduce aún más en temperatura por el calentador de aire. [4]

3.11 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético es la relación entre el ingreso y el egreso de energía del sistema. Cuando el balance energético es cero quiere decir que hay un equilibrio entre la cantidad de energía que ingresa y la cantidad de energía que es utilizada. Un balance energético positivo hace referencia al hecho en el cual ingresa más energía de la que se gasta. Por el contrario, en un balance energético negativo, la entrada de energía es menor que los requerimientos del sistema. [5]

3.12 ANÁLISIS EXERGÉTICO

La exergía hace referencia a la unidad potencial de una determinada fuente de energía, también se define como el trabajo máximo teórico que puede obtenerse de la interacción de un sistema y el ambiente de referencia. El análisis de exergía combina la primera y segunda ley de la termodinámica, y es una herramienta para analizar tanto la cantidad como la calidad de la utilización de energía. Éste es el máximo trabajo útil que puede obtenerse conforme a la irreversibilidad de los procesos y la forma en que las irreversibilidades destruyen la exergía [5].

Aspectos importantes de la exergía:

- La exergía es una propiedad de los sistemas cerrados.
- El valor de la exergía no puede ser negativo. Las transferencias de exergía asociadas a flujos de energía en tránsito (en forma de calor o trabajo) pueden tener uno u otro signo dependiendo del sentido y naturaleza de dichos flujos.
- La exergía no se conserva, sino que se destruye a causa de las irreversibilidades.

Este parámetro mide la calidad de energía, es decir, la capacidad de originar una transformación, que se emplea para analizar la eficiencia energética de un proceso.

$$E_{sys} = E_{sys}^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH}$$

Esys	Exergía del sistema
EPH	Exergía física
EKN	Exergía cinética
EPT	Exergía potencial
ECH	Exergía química

Tabla 1 Tipos de exergía

3.13 IRREVERSIBILIDADES

El concepto de irreversibilidad hace referencia a los procesos que no son reversibles en el tiempo (como la entropía). Sucede cuando en un sistema termodinámico en el cual las moléculas son trasladadas de un estado a otro, luego de esto, la configuración de los átomos de dichas moléculas cambiará (figura 4). Durante esta transformación habrá pérdida o disipación de energía calorífica [8].

El resultado será que esta energía que se disipa no se recupera si el proceso se invierte [6].

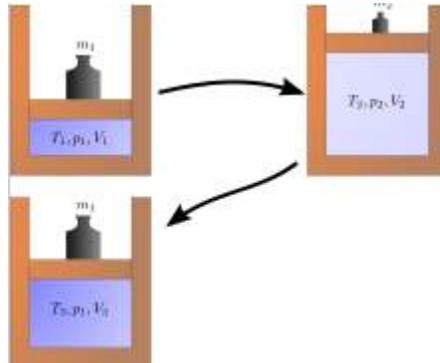


Figura 4 Diagrama de cambio de un sistema adaptado de [8]

3.14 ESQUEMA DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR

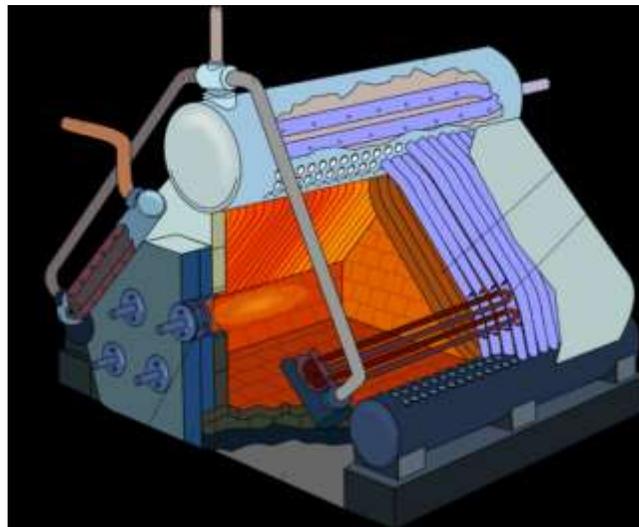


Figura 5 Esquema de caldera acuotubular adaptado de [7]

Numero	Descripción
1	Sentina
2	Aire de Combustión
3	Atomizador de combustible
4	cabecera sobrecalentador
5	Vapor sobrecalentado a la sala de máquinas
6	Vapor Saturado de despegue
7	Tambor de vapor
8	entrada de agua de alimentación
9	burbujas de vapor que forman
10	Vapor sobrecalentado
11	Asientos dela caldera

Tabla 2 Descripción de las partes de la caldera acuotubular [7]

4. ESQUEMA GENERAL DE LA CALDERA BAGACERA.

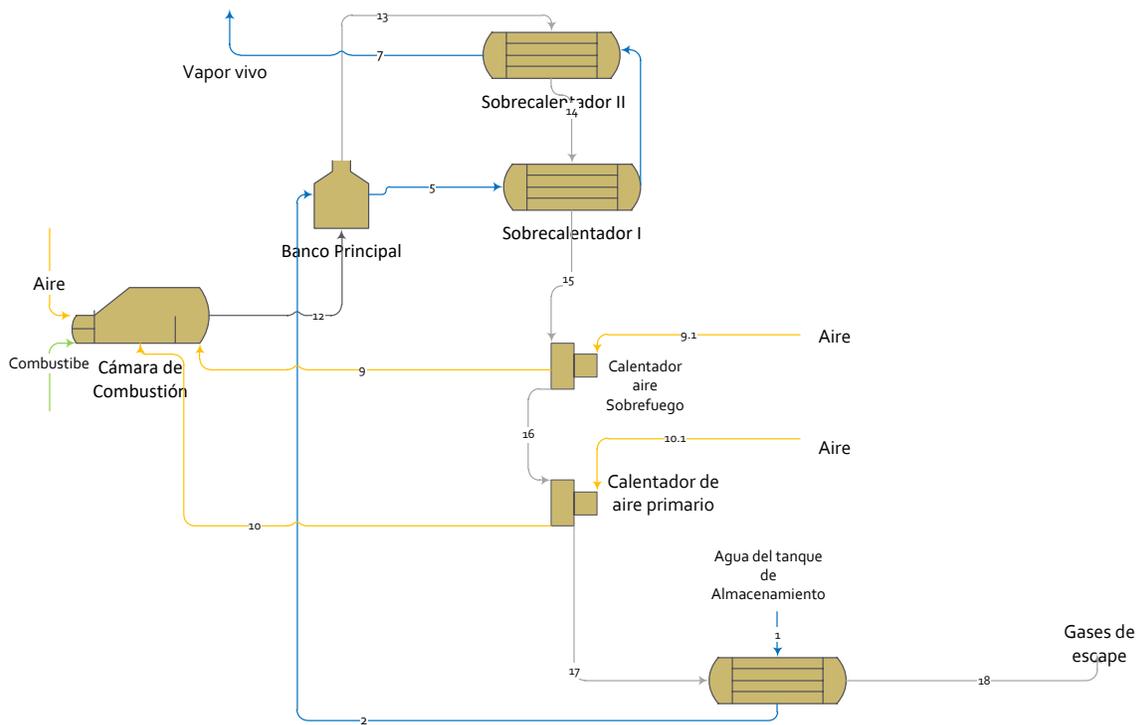


Figura 6 Esquema general de la caldera bagacera, adaptado de [6]

La caldera acuatubular inicio operaciones en el año 2009 y posee una de las instalaciones más grandes del país, esta fue diseñada para quemar bagazo, carbón o una mezcla de los dos combustibles.

La caldera cuenta con 3 sistemas de recuperación de calor los cuales son:

- Calentador de aire sobrefuego
- Calentador de aire forzado
- economizador

Las características básicas de la caldera acuotubular es la siguiente:

CARACTERISTICA	UNIDAD	ESPECIFICACIONES
Fabricante		Walchandnagar
Modelo		BT 501
País de fabricación		INDIA
Tipo de Caldera		Acuotubular, dos domos, un solo paso, circulación natural, suspendida, combustible principal: 100% Bagazo, combustible alterno: 100% Carbón, combustible auxiliar: 30% Bagazo pitting.
Combustible principal		Bagazo
Combustible alterno		Carbón
Parrilla		Viajera - Descarga frontal
Capacidad máxima continua	M lb/hr (Ton/hr)	100% Bagazo: 400 (181) 100% Carbón: 350 (159)
Presión de diseño	Psig (Kg/cm ²)	1159(81.5)
Presión de operación	Psig(kg/cm ²)	955(67)

Tabla 3 Características de la caldera acuotubular adaptado de [6]

4.1 ESQUEMA DE CÁLCULOS QUE SE REALIZO PARA EL PROYECTO

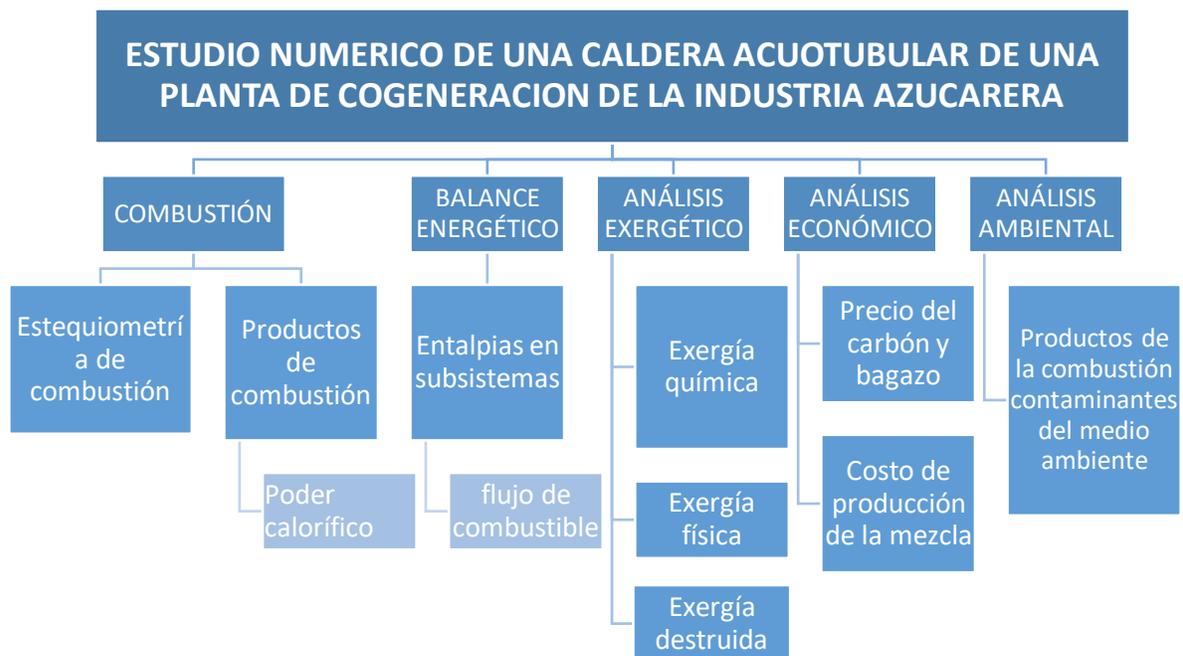


Figura 7 Esquema de cálculo de proyecto

Este proyecto se llevó a cabo utilizando las herramientas que nos ofrecen la Universidad Autónoma de Bucaramanga y la cual estuvimos utilizando a lo largo del trayecto universitario. El software utilizado es Engineering Equation Solver (EES).

5. COMBUSTIÓN

La caldera acuotubular del ingenio azucarero funciona con la quema de bagazo, carbón y una mezcla de ambos combustibles

Para el análisis de combustión se utilizaron las siguientes mezclas de bagazo y carbón. El combustible utilizado para ser quemado posee la siguiente composición:

Combustible	Porcentaje en peso					
	Humedad	Carbono	Hidrogeno	Oxigeno	Nitrógeno	Azufre
BAGAZO 100%	51,29%	23,48%	3,25%	21,98%	0,00%	0,00%
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	35,90%	16,43%	2,27%	15,38%	0,00%	0,00%
	3,00%	18,87%	1,59%	5,10%	0,66%	0,76%
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	25,64%	11,74%	1,63%	10,99%	0,00%	0,00%
	5,01%	31,45%	2,66%	8,50%	1,10%	1,29%
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	15,39%	7,04%	0,98%	6,60%	0,00%	0,00%
	7,01%	44,03%	3,73%	11,90%	1,54%	1,72%
CARBÓN 100%	10,02%	62,91%	5,32%	17,00%	2,20%	2,55%

Tabla 4 Composición de combustible

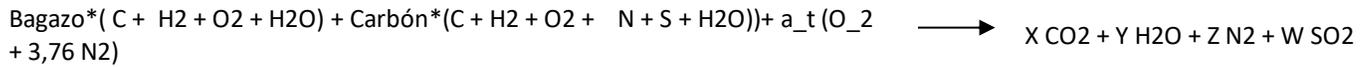
Para la combustión es importante que el combustible sea lo más puro posible, por lo tanto, las cenizas se desprecian debido a que generan una gran cantidad de impurezas, obteniendo así un equivalente considerable de pérdidas.

5.1 COMBUSTIÓN IDEAL

Inicialmente se realiza un análisis de la combustión presente en la Caldera acuotubular, para así obtener las moles que se queman de cada uno de los

componentes del combustible utilizado, así como las moles de aire utilizadas en la combustión con ayuda de la composición de los gases de escape de la caldera.

El balance ideal del combustible se realizó teniendo en cuenta la fracción molar sin cenizas de cada uno de sus componentes como muestra la siguiente tabla



$$X = C_{\text{bagazo}} + C_{\text{carbon}} \quad \text{Balance de Carbono} \quad (1)$$

$$Y = \frac{(2 * H_{2\text{bagazo}}) + (2 * H_2O_{\text{bagazo}}) + (2 * H_{2\text{carbon}}) + (2 * H_2O_{\text{carbon}})}{2} \quad \text{Balance de hidrógeno} \quad (2)$$

$$2x + y + 2w = (2 * O_{2\text{bagazo}}) + (H_2O_{\text{bagazo}}) + (2 * O_{2\text{carbon}}) + (H_2O_{\text{carbon}}) + (2a_t) \quad \text{Balance de Oxígeno} \quad (3)$$

$$2Z = N_{2\text{carbon}} * (a_t * 2 * 3,76) \quad \text{Balance de Nitrógeno} \quad (4)$$

$$W = S_{\text{carbon}} \quad \text{Balance de Azufre} \quad (5)$$

Tabla 5 Coeficientes del balance de la combustión ideal

Para cada mezcla de combustible se obtuvieron los siguientes moles:

COMBUSTIBLE	W	X	Y	Z
BAGAZO 100%	0	0,2749	0,6286	0,0965
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	0,0026	0,3643	0,5455	1,526
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	0,0043	0,4239	0,4901	1,81
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	0,0061	0,4835	0,4347	2,094
CARBÓN 100%	0,0087	0,573	0,3516	2,52

Tabla 6 Moles producto de la combustión

5.2 RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE

En el proceso de combustión es necesario conocer tanto la cantidad de aire como la cantidad de combustible por lo tanto se tiene en cuenta las moles de cada componente y su masa molecular para hallar las moles del combustible y con este último obtener la relación aire-combustible.

$$M_{comb} = (12 * C_{bagazo}) + (2 * H_{2bagazo}) + (32 * O_{2bagazo}) + (18 * H_2O_{bagazo}) \quad (6)$$

$$+(12 * C_{carbon}) + (2 * H_{2carbon}) + (32 * O_{2carbon}) + (18 * H_2O_{carbon}) +$$

$$(28 * N_{2carbon}) + (32 * S_{carbon})$$

$$AC_t = \frac{(a_t * 4,76 * \text{PesoM}_{\text{aire}})}{(1 * M_{\text{mezcla}})} \quad (7)$$

La relación aire-combustible para cada una de las mezclas es:

COMBUSTIBLE	RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE
BAGAZO 100%	2,83
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	4,21
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	5,24
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	6,38

CARBÓN 100%	8,34
-------------	------

Tabla 7 Relación aire-Combustible

5.3 PODER CALORÍFICO INFERIOR

Una vez conocidas las moles de los productos del balance ideal se debe tener en cuenta la siguiente ecuación:

$$H = Moles * (h^{\circ} + h - h') \quad (8)$$

En donde h° es la entalpia de formación del compuesto, h es la entalpia del compuesto y h' es la entalpia del compuesto a temperatura ambiente.

Para la combustión del bagazo se tuvo en cuenta que tanto la entalpia (h) y la entalpia h' están a una temperatura ambiente por lo tanto se desprecian, obteniendo la ecuación final:

$$PC = (X * (-393520) + Y * (-241820)) - H2O_{bagazo} * (-285830) + H2O_{carbon} * (-285830) \quad (9)$$

Donde las unidades del poder calorífico son KJ/Kg

$$PC_{masa} = \frac{PC}{M_{mezcla}} \quad (10)$$

El poder calorífico para cada una de las mezclas es:

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO[KJ/Kg]
BAGAZO 100%	10377
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	14489
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	17572
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	20979
CARBÓN 100%	26818

Tabla 8 Poder calorífico del combustible

La siguiente grafica muestra la cantidad de poder calorífico de cada una de las mezclas de combustible analizadas. La figura 8 muestra al carbón como el combustible de mayor poder calorífico. El incremento de carbón en la mezcla incrementa el poder calorífico de la misma, ver figura 8.

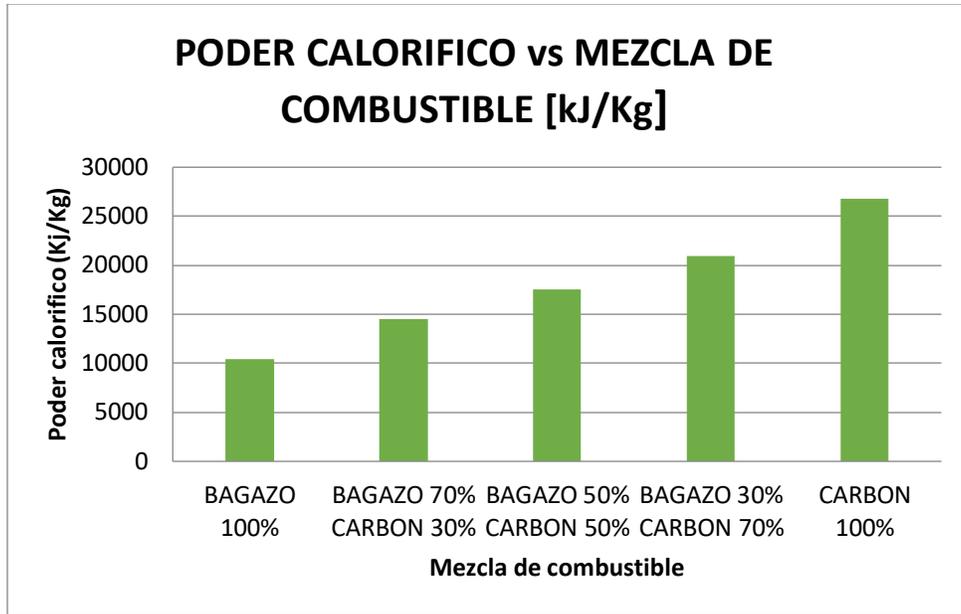
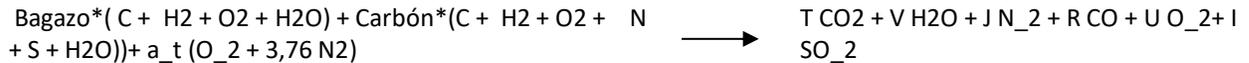


Figura 8 Mezcla de Combustible vs Poder calorífico

5.4 COMBUSTION REAL



Teniendo en cuenta un exceso de aire de 30% estipulado en el manual de la caldera:

$$n_{aireacion}: 1 + \text{exceso de aire}$$

$$n_{aireacion}: 1 + 0.3$$

$$n_{aireacion}: 1.3$$

$$a = 0,3803$$

Para realizar el análisis real se tomó como referencia un artículo de L.A.B. Cortez y E.O. Gómez. [9] La ecuación 16 muestra la relación CO/CO₂.

$T + R = C_{bagazo} + C_{carbon}$	Balance Carbono	(11)
$2V = (2 * H_{2bagazo}) + (2 * H_{2Obagazo}) + (2 * H_{2carbon}) + (2 * H_{2Ocarbon})$	Balance Hidrógeno	(12)
$2T + V + R + 2U + 2I$		
$= (2 * O_{2bagazo}) + (H_{2Obagazo}) + (2 * O_{2carbon}) + (H_{2Ocarbon}) + (2a)$	Balance Oxígeno	(13)
$2J = N_{2carbon} * (a * 2 * 3,76)$	Balance Nitrógeno	(14)
$I = S_{carbon}$	Balance Azufre	(15)
$(R/T) = 0,02$	Relación CO/CO ₂	(16)

Tabla 9 Coeficientes de la combustión Real

Para la combustión real se obtuvieron las siguientes fracciones molares:

COMBUSTIBLE	T [kmol/s]	V [kmol/s]	J [kmol/s]	R [kmol/s]	U [kmol/s]	I [kmol/s]
BAGAZO 100%	0,2695	0,6286	1,43	0,0053	0,0904	0
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	0,3572	0,5455	1,983	0,0071	0,1252	0,0026
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	0,4156	0,4901	2,352	0,0083	0,1484	0,0043
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	0,4741	0,4347	2,721	0,0094	0,1716	0,0061
CARBÓN 100%	0,5618	0,35	3,275	0,0112	0,2063	0,0087

Tabla 10 Moles producto de la combustión

Los calculo y valores utilizados para obtener este resultado se puede observar en el **ANEXO A**.

6. BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético se desarrolló con el fin de obtener la energía y temperaturas a la salida de cada uno de los subsistemas y para conocer la cantidad de combustible necesario operar la caldera con las diferentes mezclas.

6.1 SUBSISTEMA INTERCAMBIADOR DE CALOR: EVAPORADOR

El tamaño del hogar de las calderas está determinado por la calidad del combustible y las cenizas. Para reducir la temperatura del gas que sale del hogar hasta un nivel donde los metales álcali de las cenizas tengan la oportunidad de condensarse en forma de finas partículas sólidas, de tamaño micrométrico, en el flujo de gas en lugar de depositarse sobre las superficies de calentamiento por convección se debe instalar suficiente superficie de calefacción.

Esta es la razón por la cual, las calderas bagaceras requieren hogares más altos dado que la ceniza de este combustible posee alto contenido de metales álcali. El calor se transmite en una caldera mediante cada uno de los tres mecanismos de transferencia de calor. El calor se transmite desde los gases calientes en el hogar mediante radiación luminosa (partículas brillantes incandescentes) y no luminosa (radiación emitida por gases diatómicos CO₂ y H₂O). Estas dos formas de transferencia de calor son proporcionales a la diferencia entre las temperaturas de la fuente y el sumidero elevadas a la cuarta potencia. [6]

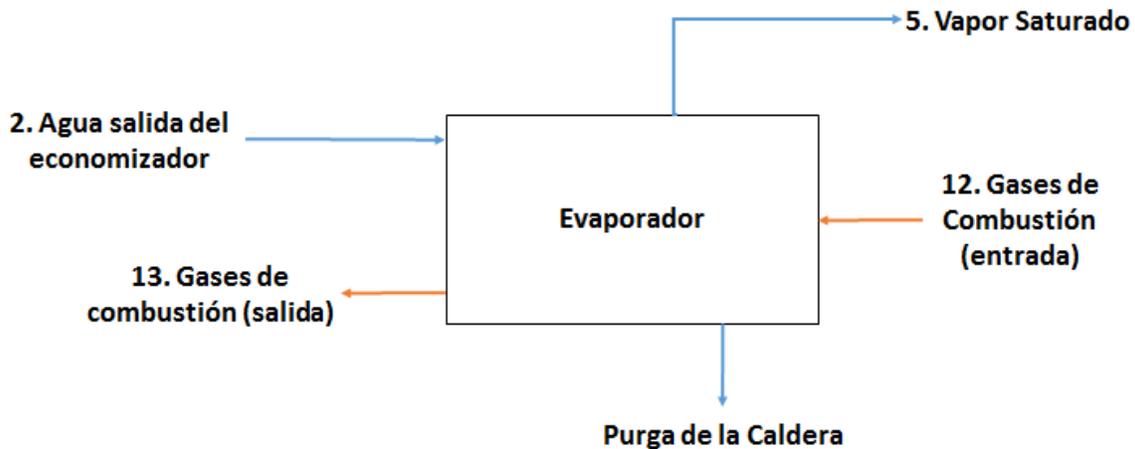


Figura 9 Intercambiador de calor

Para este subsistema se tienen los siguientes parámetros:

Variables conocidas:

EVAPORADOR	DATOS
$m_{\text{AguaM}}[\text{kg/s}]$	46,27
$m_{\text{GasesM}}[\text{kg/s}]$	107,84
$m_{\text{purga}}[\text{kg/s}]$	46,27
$h_2[\text{kJ/kg}]$	739,57
$h_5[\text{kJ/kg}]$	2766,68
$h_{12}[\text{kJ/kg}]$	2110
$h_{\text{purga}}[\text{kJ/kg}]$	1289,79
$T_{12} [\text{C}]$	1442
$cp[\text{kJ/kg C}]$	1,25

Tabla 11 Datos del evaporador

Teniendo en cuenta la figura N° 8 el balance energético es:

$$m_{\text{aguaM}} * (h_{5M} - h_{2M}) = m_{\text{gasesM}} * (h_{12M} - h_{13M}) - (m_{\text{purgaM}} * h_{\text{purgaM}})$$

Donde obtendremos la entalpía de los gases a la salida del evaporador:

$$h_{13M} = 1235 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

6.2 SUBSISTEMAS SOBRECALENTADORES I Y II.

Las 2 unidades son operadas para la formación del vapor sobrecalentado que requiere las turbinas de vapor de la planta de cogeneración. Cada flujo de vapor está debidamente instrumentado con los cual se pueden realizar los cálculos de energía.

El calor se transmite al sobrecalentador en gran medida por radiación luminosa cuando sus elementos están expuestos al hogar) y mediante radiación no luminosa y convección cuando sus elementos se encuentran protegidos contra la radiación de la cámara de combustión por medio de una pantalla o nariz de la caldera.

El vapor saturado generado en el domo superior de la caldera es conducido por medio de tubería hasta el cabezal de entrada del sobrecalentador I. El vapor circula en sentido inverso a la circulación de los gases de combustión; es decir, el flujo de gases de combustión inicia en el hogar de la caldera y sigue hacia la chimenea, pasando por todos los intercambiadores de calor, movido por la succión provocada por los ventiladores de tiro inducido. En el caso del sobrecalentador I, el vapor va hacia la pared frontal de la caldera y los gases de combustión recorren el intercambiador de calor en sentido contrario. Cuando el vapor termina su recorrido a través del sobrecalentador I, es conducido por tuberías hacia el cabezal de entrada del sobrecalentador II. En este caso, el vapor viaja a través del sobrecalentador II en sentido de los gases de combustión (hacia la pared posterior de la caldera). [6]

➤ **Sobrecalentador II**

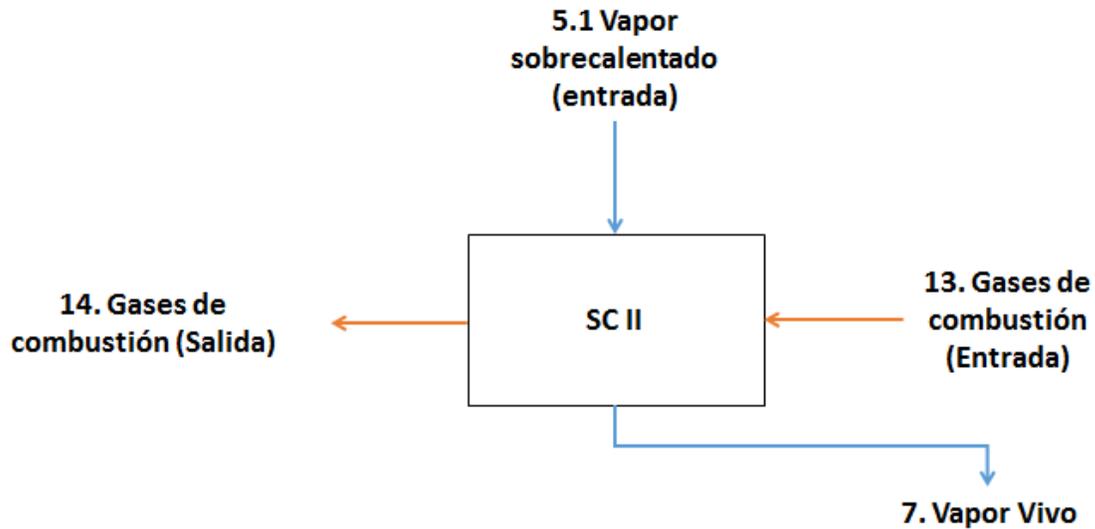


Figura 10 Sobrecalentador II

Para el Sobrecalentador II se tienen los siguientes parámetros:

Variables conocidas

SC 2	DATOS
$m_{\text{VaporM}}[\text{kg/s}]$	45,81
$m_{\text{GasesM}}[\text{kg/s}]$	107,84
$h_{5.1}[\text{kJ/kg}]$	3147
$h_7[\text{kJ/kg}]$	3444
$h_{13}[\text{kJ/kg}]$	1235

Tabla 12 Datos del sobrecalentador 2

Teniendo en cuenta la figura N° 9 El balance energético en el sobrecalentador II es:

$$m_{\text{vapor}_M} * (h_{5.1_M} - h_{7_M}) = m_{\text{gases}_M} * (h_{14_M} - h_{13_M})$$

Donde obtendremos la entalpía de los gases a la salida del sobrecalentador II es:

$$h_{14_M} = 1109 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

➤ **Sobrecalentador I**

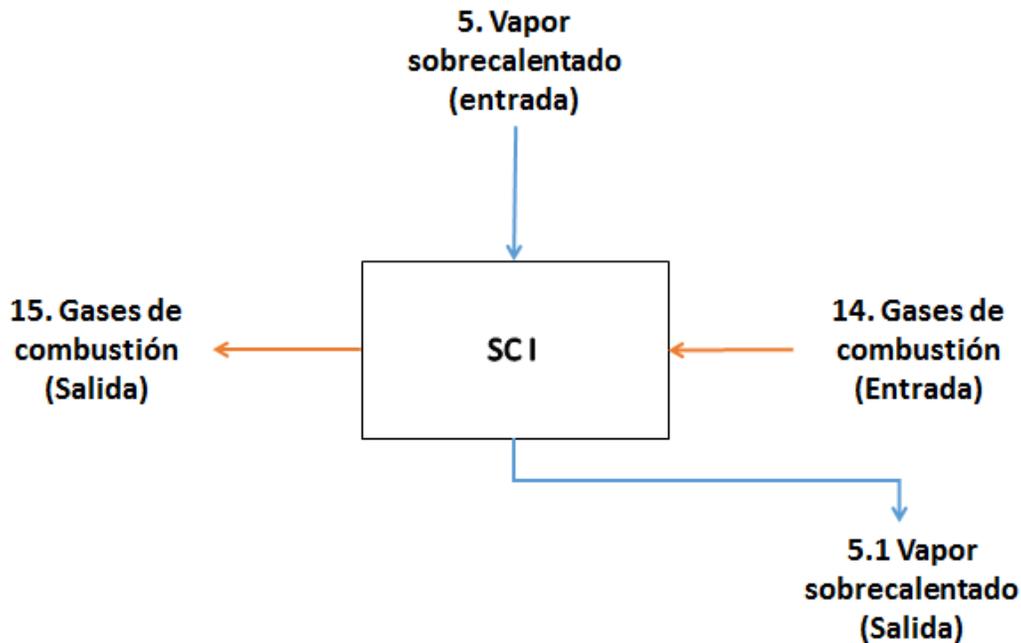


Figura 11 Sobrecalentador I

Para el Sobrecalentador I se tienen los siguientes parámetros:

Variables conocidas

SC 1	DATOS
m_{vaporM} [kg/s]	45,81
m_{gasesM} [kg/s]	107,84
$h_{5.1}$ [kJ/kg]	3147
h_5 [kJ/kg]	2766,68
h_{14} [kJ/kg]	1109

Tabla 13 Datos del sobrecalentador 1

Teniendo en cuenta la figura N° 10 El balance energético en el sobrecalentador I es:

$$m_{vaporM} * (h_{5M} - h_{5.1M}) = m_{gasesM} * (h_{15M} - h_{14M})$$

Donde obtendremos la entalpía de los gases a la salida del sobrecalentador I es:

$$h_{15M} = 947,1 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

6.3 SUBSISTEMA CALENTADOR DE AIRE SOBREFUEGO.

Para obtener una combustión estable a la hora de quemar el bagazo el cual contiene un bajo índice de preparación, es necesario proporcionar aire sobrefuego a través de la pared trasera del hogar. Los calentadores de aire recuperan la energía de los humos, antes de ser evacuados a la atmósfera, y son necesarios para obtener una alta eficiencia en la caldera. El bagazo con alto índice de preparación, una gran proporción del aire sobrefuego debe introducirse a través y por encima de los distribuidores. Los niveles inferiores del aire sobrefuego se suministran para ayudar a la quema de pilas de bagazo que pueden existir sobre la parrilla. El siguiente nivel controla la estabilidad del hogar y el resto de niveles suministran aire para completar la combustión, controlar las emisiones y controlar la temperatura del vapor. Entre el 40 y 60% del suministro total del aire debe ser introducido como aire sobrefuego y aire distribuidor.

Los calentadores están hechos de acero y deben estar aislados para evitar que haya pérdidas de calor. Los calentadores de aire ayudan a incrementar el rendimiento de una caldera. La mejora en el rendimiento al incluir este dispositivo depende también de: su localización, su capacidad de producción de vapor y de si el equipo dispone o no de economizador ya que éste absorbe también calor de los gases de escape. [6]

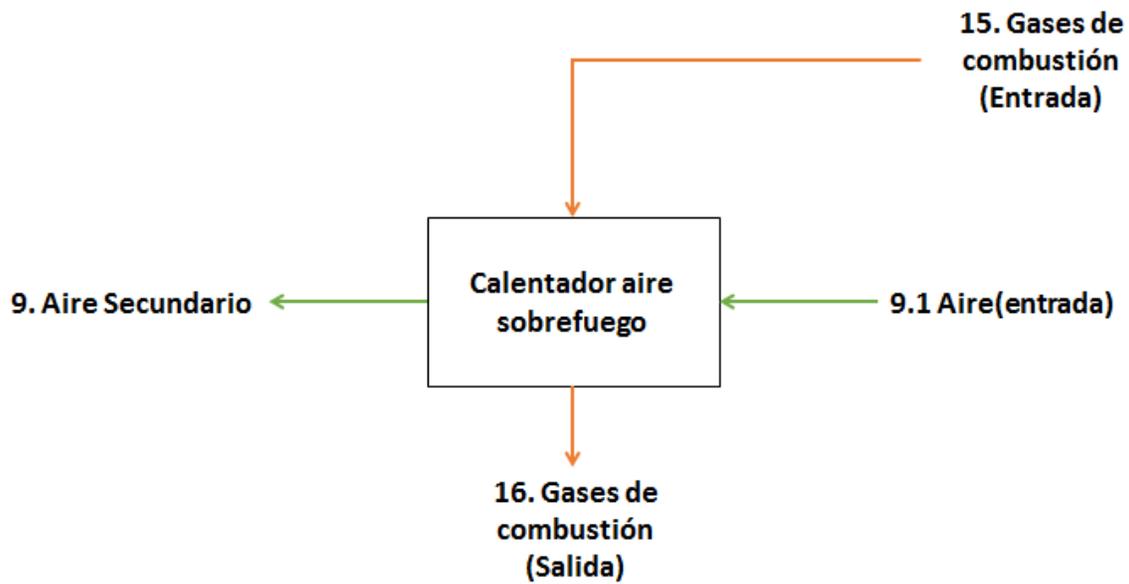


Figura 12 Calentador de aire sobrefuego

Para el Calentador de aire sobrefuego se tienen los siguientes parámetros:

Variables conocidas

CA. SOBREFUEGO	DATOS
$m_{AireSec} [kg/s]$	21,6
$m_{GasesM} [kg/s]$	107,84
$h_{9.1} [kJ/kg]$	298,16
$h_9 [kJ/kg]$	659,09
$h_{15} [kJ/kg]$	947,1

Tabla 14 Datos del calentador de aire sobrefuego

Teniendo en cuenta la figura N° 11 El balance energético en el calentador de aire sobrefuego es:

$$m_{aire\ secundario} * (h_{9.1M} - h_{9M}) = m_{gasesM} * (h_{16M} - h_{15M})$$

La entalpía de los gases a la salida del calentador de aire sobrefuego es:

$$h_{16M} = 874,8 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

6.4 SUBSISTEMA: CALENTADOR DE AIRE FORZADO

En una caldera acuotubular, el calentador de aire normalmente se encuentra antes del economizador. Las Velocidades de los gases de combustión a través del calentador son por lo general por debajo de 25 m/s.

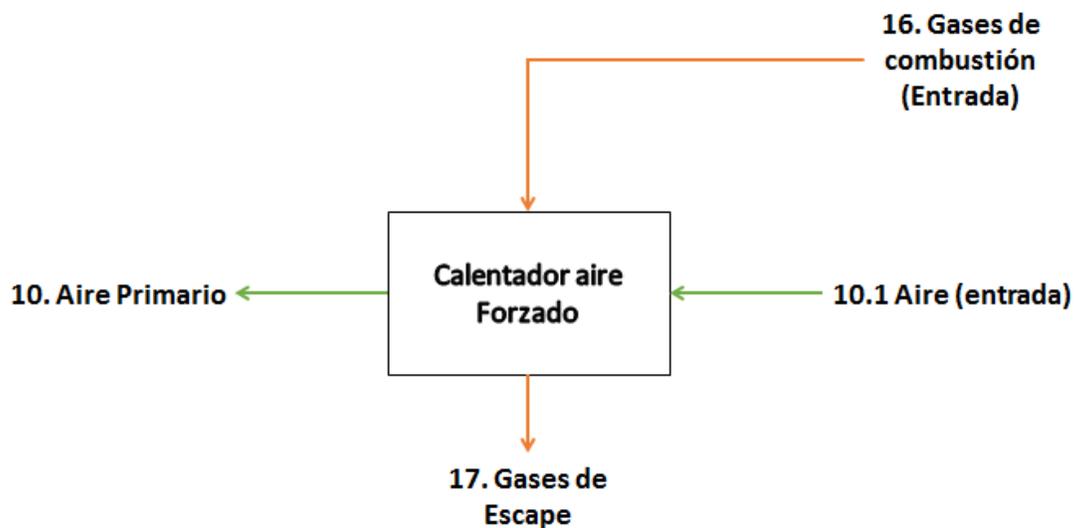


Figura 13 Calentador de aire primario

Para el Calentador de aire forzado se tienen los siguientes parámetros:

Variables conocidas

CA. FORZADO	DATOS
$m_{\text{AirePrim}}[\text{kg/s}]$	53,62
$m_{\text{GasesM}}[\text{kg/s}]$	107,84
$h_{10.1}[\text{kJ/kg}]$	298,16
$h_{10}[\text{kJ/kg}]$	517,58
$h_{16}[\text{kJ/kg}]$	874,8

Tabla 15 Datos del calentador de aire forzado

Teniendo en cuenta la figura N° 12 El balance energético en el calentador de aire forzado es:

$$m_{aire_{primario}} * (h_{10.1M} - h_{10M}) = m_{gasesM} * (h_{17M} - h_{16M})$$

La entalpía de los gases a la salida del calentador de aire forzado es:

$$h_{17M} = 765,7 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

6.5 SUBSISTEMA ECONOMIZADOR.

Los economizadores son intercambiadores constituidos por bancos tubulares, que se utilizan para calentar el agua de alimentación de la caldera. Los economizadores reducen la posibilidad de que se presenten choques térmicos y grandes fluctuaciones en la temperatura del agua de alimentación de la caldera, que llega a las paredes de tubos de agua que configuran el hogar. En los economizadores es absorbido entre 10 a 20% del calor disponible. Poseen una superficie tipo serpentín y están localizados, generalmente, después del calentador de aire en el sentido del flujo de gases.

El movimiento del agua con relación a los gases es en contracorriente y la disposición de los tubos es triangular. El diámetro de los tubos del economizador está en el rango de 21 a 32 mm con un espesor de pared de 2,5 a 4 mm. En relación a la pared frontal de la caldera, los tubos pueden estar situados de forma perpendicular o paralela.

En un economizador la temperatura del agua de alimentación de calderas normalmente se eleva de 105 ° C hasta niveles de 150 y 180 °C. La temperatura de salida debe estar muy por debajo del punto de ebullición para evitar la concentración de sólidos. Al mismo tiempo, la temperatura del gas de combustión no debe caer por debajo de su punto de rocío para reducir al mínimo corrosión. Los economizadores están diseñados para velocidades de gases que no excedan.

[6]

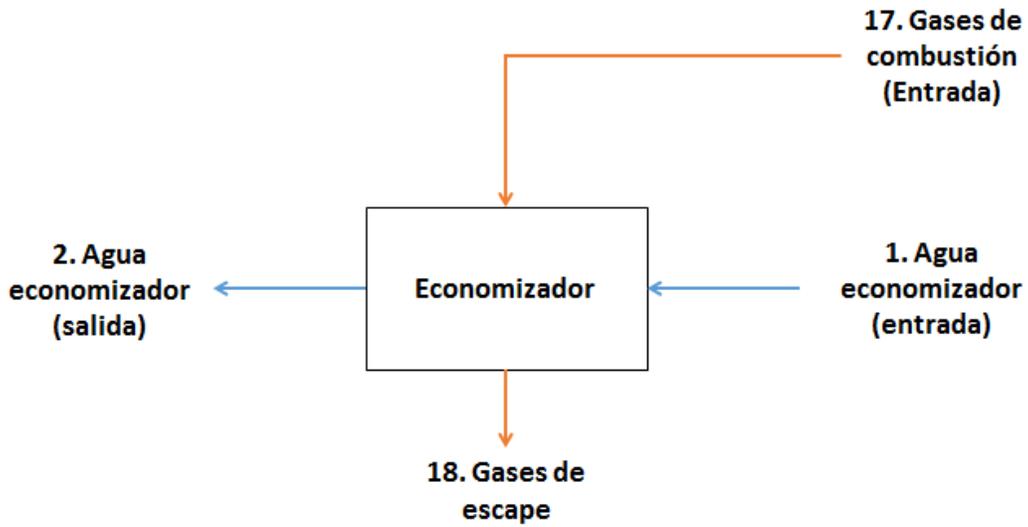


Figura 14 Economizador

Para el Economizador se tienen los siguientes parámetros:

Variables conocidas

ECONOMIZADOR	DATOS
$m_{\text{AguaM}}[\text{kg/s}]$	46,27
$m_{\text{GasesM}}[\text{kg/s}]$	107,84
$h_1[\text{kJ/kg}]$	478,52
$h_2[\text{kJ/kg}]$	739,57
$h_{17}[\text{kJ/kg}]$	765,7

Tabla 16 Datos de economizador

Teniendo en cuenta la figura N° 13 El balance energético en el economizador es:

$$m_{\text{agua}_M} * (h_{1M} - h_{2M}) = m_{\text{gases}_M} * (h_{18M} - h_{17M})$$

La entalpía de los gases a la salida del calentador de aire forzado es:

$$h_{18M} = 653,7 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

6.6 SUBSISTEMA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

La cámara de combustión es el espacio comprendido entre la parrilla, las paredes laterales del horno y la pared frontal. El volumen de la cámara de combustión debe ser proporcional al volumen de los gases necesarios para la combustión. Este volumen se relaciona con la cantidad de calor liberado por unidad de tiempo por el combustible empleado. Existe una relación entre la superficie de calentamiento de la caldera y la cantidad de vapor que puede producir, por esta razón, el volumen de la cámara de combustión puede también relacionarse con la superficie de calentamiento que tenga la caldera.

La cámara de combustión en una caldera está generalmente bien aislada, razón por la cual la disipación de calor respecto al ambiente circundante es casi nula. Por otro lado.

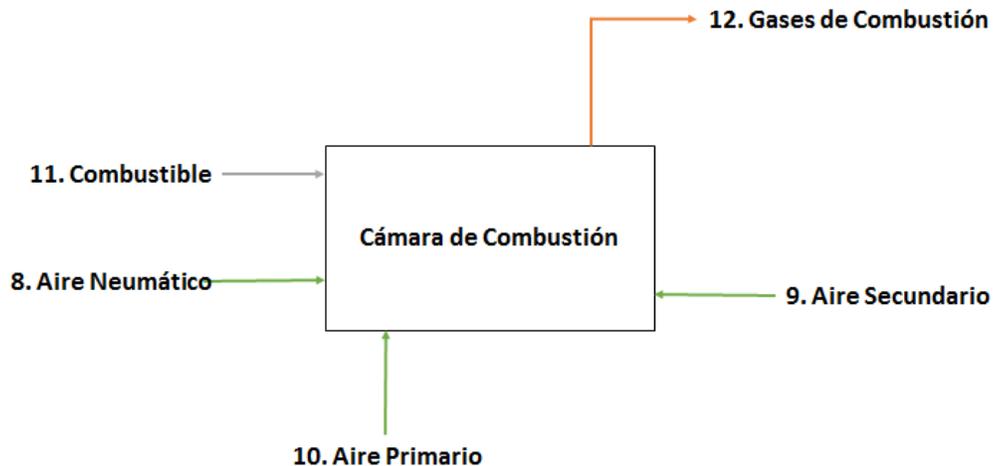


Figura 15 Cámara de combustión

Variables conocidas

CAM. COMBUSTIÓN	DATOS
$m_{\text{AirePrim}}[\text{kg/s}]$	53,62
$m_{\text{GasesM}}[\text{kg/s}]$	107,84
$m_{\text{AireSec}}[\text{kg/s}]$	21,6
$h_9[\text{kJ/kg}]$	659,09
$h_{10}[\text{kJ/kg}]$	517,58
$h_{12}[\text{kJ/kg}]$	2110

Tabla 17 Datos de la cámara de combustión

Teniendo en cuenta la figura N^a 14 El balance energético en la cámara de combustión es:

$$(m_{comb} * PC) + (m_{airesecundario} * h_{9M}) + (m_{aireprimario} * h_{10M}) + (m_{aire} * h_{aire}) = (m_{gases_M} * h_{12M})$$

En la siguiente tabla se observa la cantidad de flujo por segundo teniendo en cuenta las diferentes mezclas utilizadas:

COMBUSTIBLE	FLUJO[kg/s]
BAGAZO 100%	22,86
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	16,54
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	13,7
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	11,52
CARBÓN 100%	9,044

Tabla 18 Flujo de combustible

Los calculo y valores utilizados para obtener este resultado se puede observar en el **ANEXO B**.

En el capítulo 7 se realizó un análisis energético en el cual se halló la cantidad de energía en cada entrada y salida de los gases de combustión en los subsistemas estudiados. Se estima la cantidad de combustible necesario para producir el vapor en las condiciones requeridas, que es utilizado en la turbina para generar energía eléctrica y en el proceso del ingenio azucarero.

La figura 20 muestra la cantidad de combustible necesario mara cada mezcla estudiada:

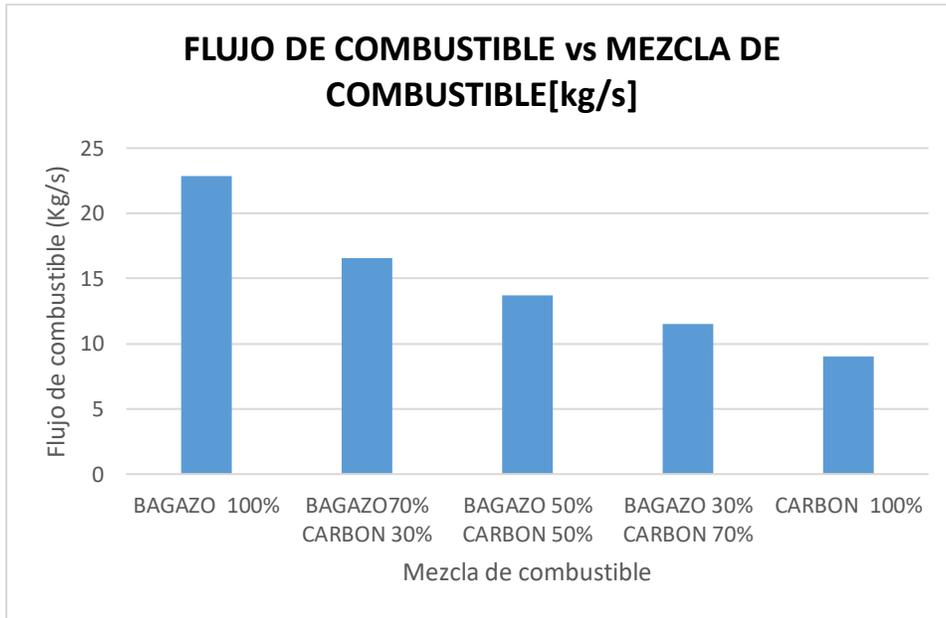


Figura 16 Mezcla de combustible vs flujo

En la figura 16 se puede observar que, para producir la cantidad de vapor, el carbón es el más indicado debido a que necesita la menor cantidad de combustible, en cambio se necesitaría mayor cantidad de bagazo para cumplir las expectativas del vapor vivo.

7. EFICIENCIA

El cálculo de eficiencia se define como la relación entre la salida de energía y el suministro de energía por unidad de tiempo. La eficiencia esta expresada como porcentaje, es decir:

$$\eta_{caldera} = \frac{P_{util\,caldera}}{P_{termica\,caldera}}$$

La potencia útil de la caldera esta expresada en la siguiente ecuación:

$$P_{util\,caldera}: m_{Agua} * (\Delta h_{agua})$$

Mientras la potencia térmica dela caldera esta expresada como:

$$P_{termica\,caldera}: m_{comb} * PC_{masa}$$

La eficiencia de la caldera para cada una de las mezclas de combustible es el siguiente:

COMBUSTIBLE	EFICIENCIA %
BAGAZO 100%	67,91
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	67,02
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	66,81
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	67,3
CARBÓN 100%	66,58

Tabla 19 Eficiencia para cada tipo de mezcla

Los calculo y valores utilizados para obtener este resultado se puede observar en el **ANEXO C**.

La eficiencia de la caldera es uno de los aspectos más importantes a estudiar en este proyecto ya que dependiendo de esta se puede escoger el combustible más adecuado para trabajar la caldera.

En el capítulo 8 se realizó el cálculo de eficiencia con el fin de conocer la mezcla combustible adecuado para trabajarla caldera.

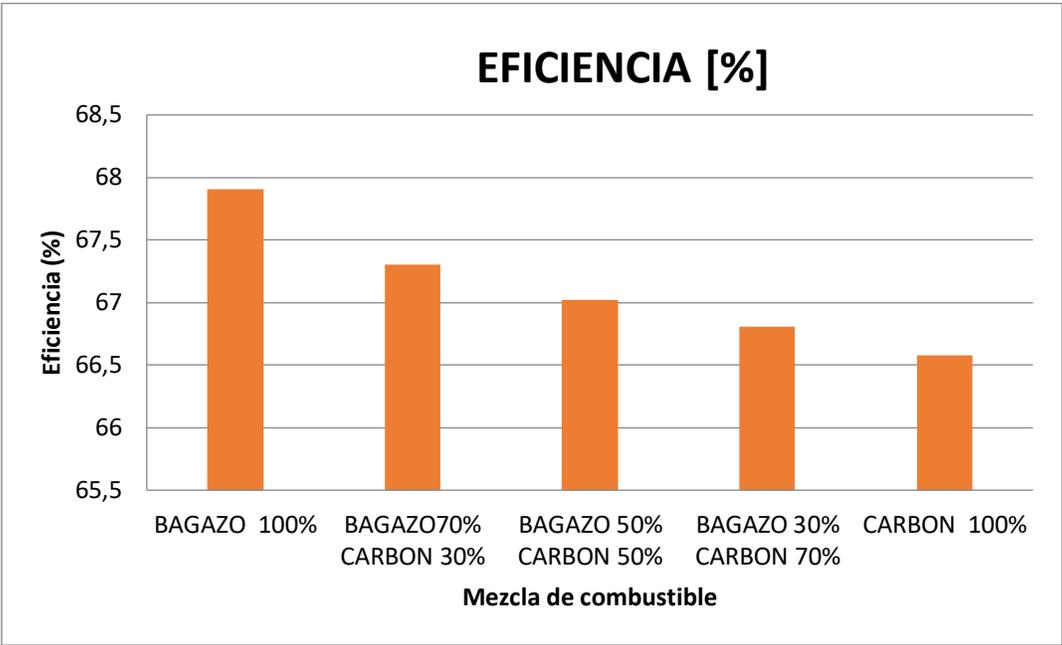


Figura 17 Eficiencia vs Mezcla de combustible

La figura 17 muestra que la diferencia de eficiencia es mínima dependiendo de cada mezcla a utilizar en la caldera, pero la más conveniente es la del bagazo ya que con este hay mayor eficiencia.

8. ANÁLISIS EXERGÉTICO

Luego de identificar la cantidad de combustible que opera la caldera se procede a realizar un análisis exergético en cada uno de los subsistemas para conocer la exergía destruida en cada uno de estos.

Primero se debe encontrar la exergía química presente en la reacción de la combustión para cada compuesto, los resultados se pueden observar en las siguientes tablas:

8.1 EXERGÍA QUÍMICA

EXERGÍA DE REACTIVOS

La exergía química para cada uno de los componentes varía dependiendo del tipo de combustible:

Para combustibles fósiles sólidos con una relación oxígeno carbono menor a 0,667 la exergía química de los componentes carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno se obtiene teniendo en cuenta la siguiente ecuación en términos de relación de masa. Se debe resaltar que esta ecuación es para combustibles sólidos exceptuando la madera [9].

$\varepsilon = 1,0437 + 0,1882 * \frac{H}{C} + 0,0610 * \frac{O}{C} + 0,0404 * \frac{N}{C}$	(17)
---	------

Para combustibles fósiles solidos con una relación oxígeno carbono mayor a 0,667 y menor a 2, 67 incluyendo la madera, se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{1,0437 + 0,1882 * \frac{H}{C} - 0,2509 * \left(1 + 0,7256 * \frac{H}{C}\right) + 0,0383 * \frac{N}{C}}{1 - 0,3035 * \frac{O}{C}} \quad (18)$$

Las ecuaciones anteriores son importantes para hallar tanto la exergía química de los reactivos del bagazo como las del carbón, por último, se halla la exergía química de los reactivos totales con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{Q_{Reactivos}} = \varepsilon * PC \quad (19)$$

Los resultados de la exergía química de los reactivos dependiendo de cada mezcla de combustible es la siguiente:

COMBUSTIBLE	EXERGÍA QUÍMICA REACTIVOS [kJ/kmol]
BAGAZO 100%	161564
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	239860
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	208819
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	270533
CARBÓN 100%	315850

Tabla 20 Exergía Química de los Reactivos

8.2 EXERGÍA DE PRODUCTOS

La exergía química de los productos se realiza teniendo en cuenta la siguiente ecuación [10]:

$$\varepsilon_{Q_{productos}} = \sum_i x_i * \varepsilon_{quimica} + R * T_o * \sum_i x_i \ln x_i \quad (20)$$

El resultado de la exergía química de los productos teniendo en cuenta cada una de las mezclas de combustible es el siguiente:

COMBUSTIBLE	EXERGÍA QUÍMICA PRODUCTOS [kJ/kmol]
BAGAZO 100%	3927
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	3512
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	3631
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	3446
CARBÓN 100%	3396

Tabla 21 Exergía Química de productos

Teniendo los resultados de las exergías químicas de los reactivos y los productos se lleva a cabo la siguiente ecuación para obtener la exergía química total:

$$\varepsilon_{Q_{TOTAL}} = \varepsilon_{Q_{Reactivos}} + \varepsilon_{Q_{productos}} \quad (21)$$

La exergías química total para cada uno de las mezclas de combustible es la siguiente:

COMBUSTIBLE	EXERGÍA QUÍMICA TOTAL [kJ/kmol]
BAGAZO 100%	157638
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	236358
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	205196
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	267087
CARBÓN 100%	312454

Tabla 22 Exergía Química total

8.3 ENERGÍA FÍSICA

Una vez se calcula la exergía química del combustible, se calcula la exergía física de los mismos en cada uno de los subsistemas. Esta exergía es calculada teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la temperatura y la presión [11].

Para hallar la exergía física de los productos de cada combustible se debe tener en cuenta la siguiente ecuación:

$E_F = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	(22)
----------------------------------	-------------

La exergía física para cada uno de los productos del combustible en la entrada y salida de cada uno de los subsistemas es el siguiente:

COMBUSTIBLE	EXERGÍA FÍSICA 12 [kJ/kmol]	EXERGÍA FÍSICA 13 [kJ/kmol]	EXERGÍA FÍSICA 14 [kJ/kmol]	EXERGÍA FÍSICA 15 [kJ/kmol]	EXERGÍA FÍSICA 16 [kJ/kmol]	EXERGÍA FÍSICA 17 [kJ/kmol]	EXERGÍA FÍSICA 18 [kJ/kmol]
BAGAZO 100%	58294	25200	21017	15892	13694	10500	7356
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	57058	24879	20776	15739	13573	10421	7342
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	56478	24731	20667	15671	13520	10388	7327
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	56021	24616	20683	15619	13481	10365	7316
CARBÓN 100%	55493	24486	20489	15562	13439	10341	7307

Tabla 23 Exergía física en cada entrada y salida de subsistema

ENERGÍA DESTRUIDA

La exergía destruida se halla teniendo en cuenta los datos de entrada y los de salida en cada uno de los subsistemas, esto se realiza con el fin de conocer la cantidad de energía que se destruye en cada subsistema.

$$Exergía_{destruida} = Ex_{entrada\ subsistema} - Ex_{salida\ subsistema} \quad (23)$$

La exergía destruida en cada subsistema teniendo en cuenta las mezclas de combustible es el siguiente:

COMBUSTIBLE	EVAPORADOR [kw]	SC2 [kw]	SC1 [kw]	C2 [kw]	C1 [kw]	ECONOMIZADOR [kw]

BAGAZO 100%	39472	4990	6112	2622	3810	3714
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	29074	3706	4552	1956	2848	2782
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	24523	3139	3860	1661	2419	2365
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	21067	2705	3330	1434	2090	2045
CARBÓN 100%	17191	2216	2731	1177	1718	1682

Tabla 24 Exergía destruida en subsistema

Los calculo y valores utilizados para obtener este resultado se puede observar en el **ANEXO D**.

El análisis exergético que se desarrolla en el capítulo 9 se realizó con el fin de hallar la exergía destruida en cada uno de los subsistemas de la caldera y conocer cuál de estos tenía la mayor cantidad de irreversibilidades.

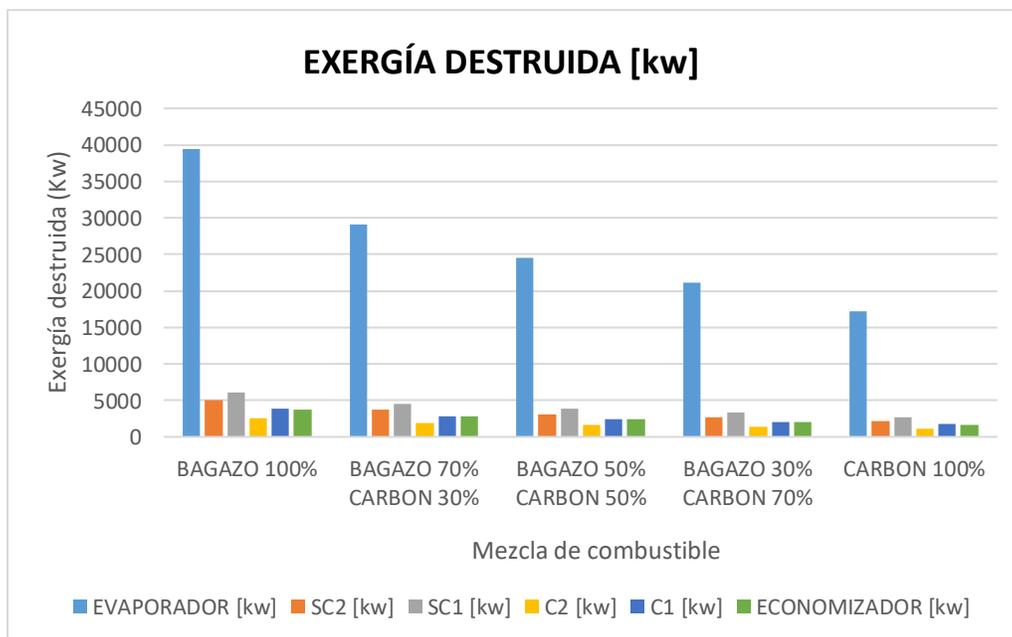


Figura 18 Exergía destruida vs mezcla de combustible

En la figura 18 se observa que el cambio de combustible es fundamental en el análisis exergético ya que, a mayor cantidad de bagazo, mayor exergía destruida y a mayor carbón, menor exergía destruida.

9. ANÁLISIS ECONÓMICO

Una vez conocida la cantidad de combustible necesario para cada una de las mezclas y las exergía de las corrientes de entrada y salida de cada uno de los subsistemas se procede a realizar el análisis económico para conocer los costos que tiene la producción de energía para cada una de las mezclas de combustible comparados en un periodo mensual.

A pesar que el bagazo tiene un costo cero para la generadora, es importante considerar que éste tiene un costo de oportunidad, ya que puede ser vendido en diferentes industrias como la industria papelera.

El precio de cada combustible es el siguiente:

9.1 PRECIO DEL CARBÓN

Para este análisis se tomó como referencia los precios publicados por Index Mundi y están dados en peso colombiano por tonelada, la figura 16 muestra los siguientes resultados del carbón:

Mes	Precio	Tasa de cambio
oct. 2016	231.185,60	-
nov. 2016	268.520,50	16,15 %
dic. 2016	270.254,80	0,65 %
ene. 2017	246.517,20	-8,78 %
feb. 2017	228.936,00	-7,13 %
mar. 2017	201.850,40	-11,83 %

Figura 19 Precio del carbón [12]

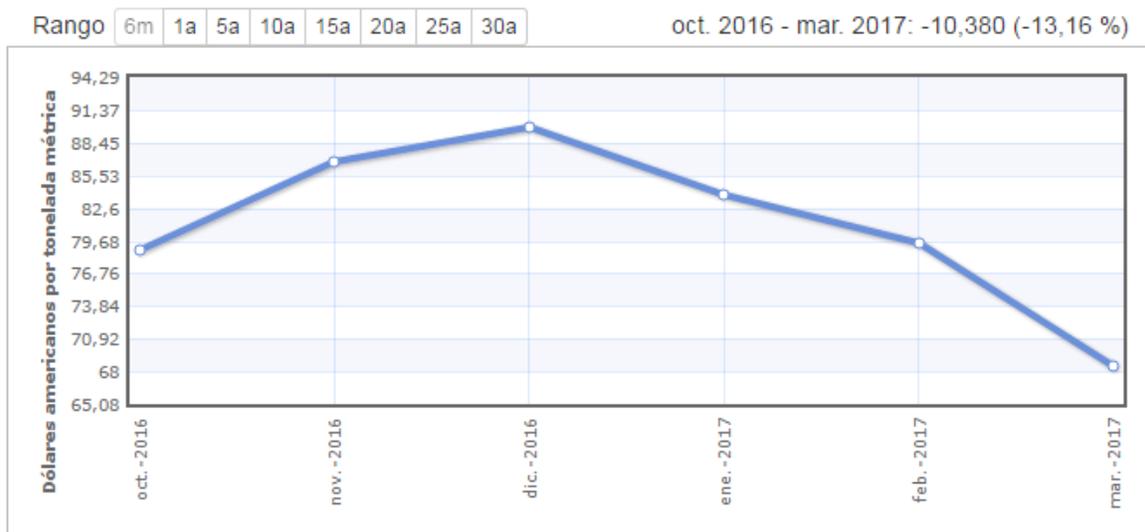


Figura 20 Precio del carbón vs tiempo [13]

En la figura 17 se observa que el precio del carbón colombiano tuvo un aumento en los meses de octubre a diciembre, pero a finales de ese mes, este combustible disminuyó considerablemente llegando a una baja del 12,16%.

9.2 DEL BAGAZO

Para el análisis del costo del bagazo se tomó como referencia los precios publicados en un proyecto de una planta de papel a partir del bagazo de caña. y muestra los siguientes resultados del bagazo:

Derivado de la caña de azúcar	Precio \$/ton
Bagazo	233692,16

Figura 21 Precio del bagazo adaptado de [14]

Por lo tanto, el costo de producción dependiendo de la mezcla de combustible es:

MEZCLA	COMBUSTIBLE [Kg/s]	PRECIO DE COMBUSTIBLE [\$/Kg]	COSTO DE PRODUCCIÓN [\$/h]	COSTO DE PRODUCCIÓN [\$/Mes]
BAGAZO 100%	22,86	233,69	19.231.752,24	13.846.861.612,80
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	16,54	224,14	13.346.073,07	9.742.633.342,56
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	13,7	217,77	10.740.416,40	7.840.503.972,00
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	11,52	211,40	8.767.263,74	6.400.102.533,12
CARBÓN 100%	9,044	201,85	6.571.913,04	4.731.777.388,80

Tabla 25 Costo de producción del combustible

El análisis económico se realizó con el fin de conocer el costo-combustible para operar la caldera, obteniendo los siguientes resultados:

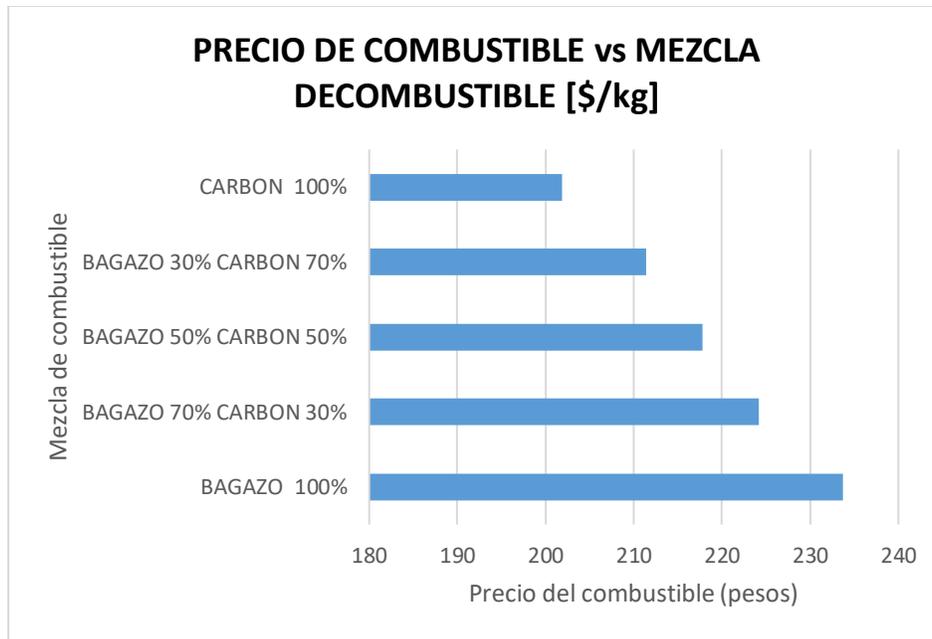


Figura 22 Mezcla de combustible vs precio por kg de combustible

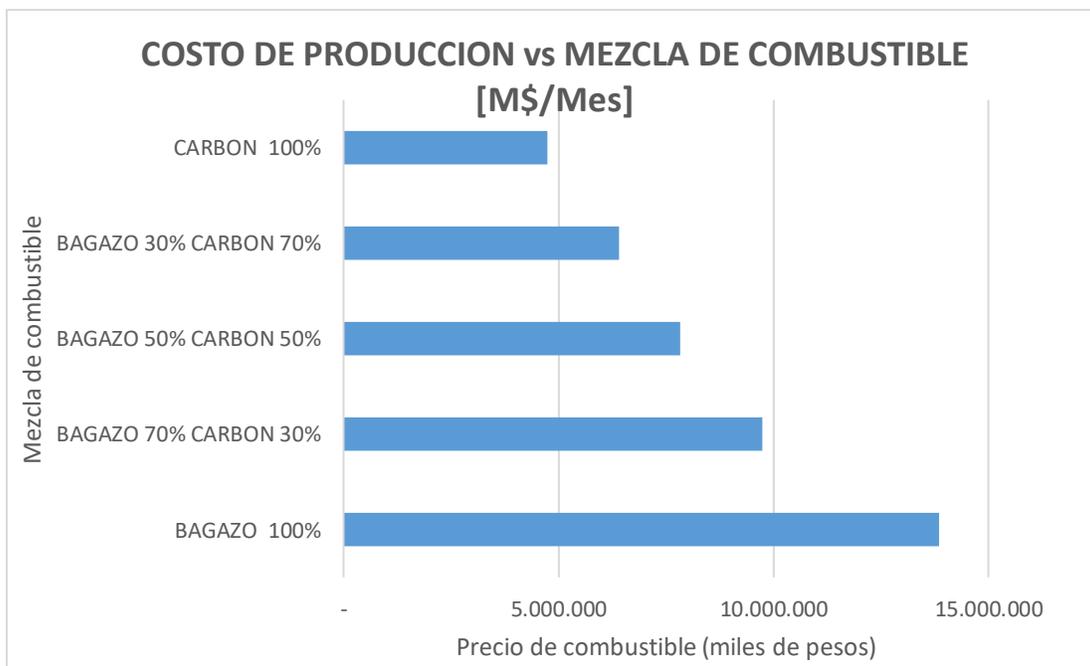


Figura 23 Mezcla de combustible vs Costo de producción mes

En las figuras 22 y 23 se observa que el carbón es el combustible más económico mientras que el bagazo es el más costoso, por lo tanto, la generación de vapor con el carbón será más económica que con bagazo.

10. ANÁLISIS AMBIENTAL

Para este proyecto se realizó un análisis ambiental para conocer cómo afecta cada uno de los productos de la combustión al medio ambiente, teniendo en cuenta cada una de las mezclas de combustible.

Es importante tener en cuenta el artículo 29 de la resolución número (909) 5 de junio de 2008 del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial el cual establece que todas las instalaciones de tratamiento térmico deben contar con un sistema el cual registre la temperatura de salida de los gases la cual tiene un máximo de 250 C, el registro de dicha temperatura está por encima de este valor se debe instalar un sistema de enfriamiento [15]. Teniendo en cuenta la combustión de cada una de las mezclas, se obtienen los siguientes productos:

COMBUSTIBLE	CO ₂ [kmol]	CO[kmol]	SO ₂ [kMol]
BAGAZO 100%	0,2695	0,0053	0
BAGAZO 70% CARBÓN 30%	0,3572	0,0071	0,0026
BAGAZO 50% CARBÓN 50%	0,4156	0,0083	0,0043
BAGAZO 30% CARBÓN 70%	0,4741	0,0094	0,0061
CARBÓN 100%	0,5618	0,0112	0,0087

Tabla 26 Productos contaminantes del ambiente [15]

A pesar de que la caldera genera esta cantidad de contaminantes, tiene instalado un separador ciclónico y un precipitador electrostático de tres campos, los cuales garantizan el cumplimiento de los estándares de calidad de las emisiones de material particulado que pide la regulación ambiental colombiana

El análisis ambiental es fundamental en este proyecto ya que con él se puede conocer la cantidad de contaminación que puede llegar a generar la caldera con cada tipo de mezcla a utilizar, la cantidad de contaminante debe estar regido según resolución No. 610 del 24 de marzo de 2010 el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial establece

En el siguiente grafico se observa los principales contaminantes y la cantidad generada con cada mezcla de combustible:

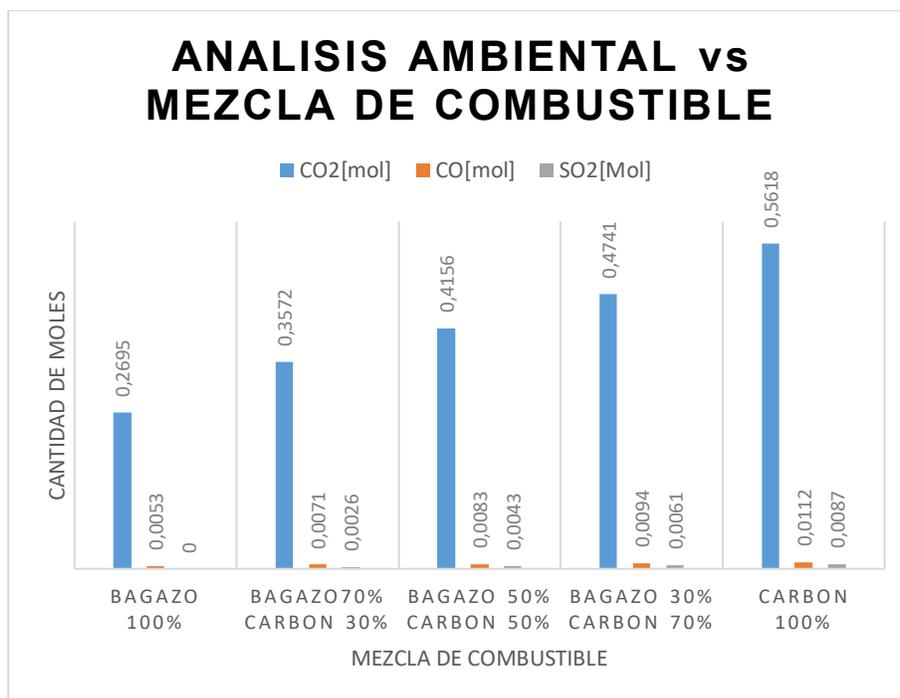


Figura 24 Mezcla de Combustible vs Contaminantes

La figura 24 muestra que el CO₂ es el principal contaminante generado por la caldera con un mínimo de 0,27 moles producidos por el bagazo y un máximo de 0,57 producidos por el carbón, mientras que SO₂ y el CO presentan mínimas cantidades de contaminación.

CONCLUSIONES

Se realiza un estudio numérico de una caldera acuotubular, desarrollando un modelo matemático basado en el primer y segundo principio de la termodinámica. Se analiza el comportamiento de la usando diferentes mezclas de combustibles (bagazo-carbón)

En el estudio realizado se evidencia que de los subsistemas analizados, los datos de mayor relevancia son los obtenidos a la salida de la cámara de combustión, ya que con estos parámetros se puede hallar la cantidad de flujo necesario para generar el vapor vivo en la caldera, objeto de estudio.

El análisis se realiza fijando el flujo de gas a la salida de la cámara de combustión (107,84 kg/s) y su temperatura (1442 °C), dando como combustible de menor costo el uso del carbón. Se requiere 9.04 kg/s de carbón, demandando 40% menos de combustible que si se opera con 100% bagazo, ya que el carbón posee mayor poder calorífico.

El evaporador es el subsistema con mayor cantidad de exergía destruida determinada en el análisis de la caldera, pero este disminuye dependiendo de la mezcla de combustible utilizada, siendo el carbón el más adecuado para trabajar la caldera con alrededor del 43% de exergía destruida menor en cada subsistema.

Se observa un incremento de la eficiencia utilizando 100% carbón ya que se obtiene una eficiencia de 66,58%, mientras que utilizando 100% bagazo se obtiene una eficiencia de 67,91%. Sin embargo se evidenció que debido al bajo PC del bagazo se de utilizar 22,86 kg/s, mientras que utilizando 100% carbón su debe usar 9,044 kg/s.

Ambientalmente el combustible más adecuado para generar el vapor vivo de la caldera es el bagazo debido a que genera cantidades mínimas de monóxido de carbono con 0,0053 kmol y 0,2695 kmol de dióxido de carbono, además, en la composición de este combustible no hay dióxido de azufre a diferencia del

carbón. El material particulado no se tomó en cuenta en el proyecto debido a que en la combustión es importante que el combustible sea lo más puro posible.

Los costos de producción de la caldera disminuyen hasta un 30% cuando la caldera opera con 100% carbón debido a que este combustible desprende mayor poder calorífico y se necesita menor cantidad para operar la caldera. Sin embargo se intuye que el bagazo no genera costo, ya que es un producto propio de la ingeniería azucarera.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Babcock & Wilcox. Steam/its generation and use. New York: Babcock & Wilcox, 1978.
- [2] Federico J. Franck Colombres. Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina; Revista industrial y agrícola de Tucumán.
- [3] Buelna Quijada, Genoveva. Propuesta de diseño y construcción de un sistema de lavado y purificado de gases de combustión, en planta piloto; método de absorción-adsorción. México: Universidad de sonora.
- [4] Díaz T, Francisco; Garrido C. Norge. Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante? Dos casos. Cuba, La Habana. ICIDCA.
- [5] T.J.Kotas. The Exergy Method of thermal plant analysis. Exergon Publishing Company UK Ltd. London 2012.
- [6] Ducarlo Leon Molina Lopez. Modelación matemática basada en análisis exergético de una caldera bagacera.
- [7] Equipo formación Alcudia II. Calderas. Dirección Corporativa de RR.HH. Endesa generación.
- [8] Grazzini; Lucia, U. Global analysis of dissipations due to irreversibility. 1997.
- [9] TJ Kotas. Solid fuels. The exergy method of termal plant analysis.
- [10] TJ Kotas. Solid fuels includes Wood. The exergy method of termal plant analysis.
- [11] TJ Kotas. Phisical exergy. The exergy method of termal plant analysis.
- [12] L.A.B. Cortez and E.O. Gómez. A method for exergy analysis of sugarcane bagasse boilers
- [13] Index Mundi. Carbón colombiano Precio Mensual - Peso colombiano por Tonelada

[14] JM Paturau. Alternative uses of sugarcane and its byproducts in agroindustries

[15] El ministro de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, Resolución número 610.

ANEXOS

ANEXO A. ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN DE LA CALDERA ACUOTUBULAR

"BAGAZO"

"COMPOSICIÓN BAGAZO"

H₂O_b=0,50
cenizas_b=0,025
C_b=0,2289
H₂_b=0,0317
O₂_b=0,2143
N₂_b=0
S_b=0,001

sumatoria_sincenizas_b=H₂O_b+C_b+H₂_b+O₂_b+N₂_b+S_b

sumatoria_sinhumedad_b=cenizas_b+C_b+H₂_b+O₂_b+N₂_b+S_b

"COMPOSICION DEL BAGAZO EN BASE SECA "

cenizas_{sh_b}=(cenizas_b/sumatoria_sinhumedad_b)
C_{sh_b}=(C_b/sumatoria_sinhumedad_b)
H₂_{sh_b}=(H₂_b/sumatoria_sinhumedad_b)
O₂_{sh_b}=(O₂_b/sumatoria_sinhumedad_b)
S_{sh_b}=(S_b/sumatoria_sinhumedad_b)

P_{comb_sh_b}=cenizas_{sh_b}+C_{sh_b}+H₂_{sh_b}+O₂_{sh_b}+S_{sh_b}

"COMPOSICIÓN BAGAZO SIN CENIZAS"

C_{sc_b}=(C_b/sumatoria_sincenizas_b)
H₂_{sc_b}=(H₂_b/sumatoria_sincenizas_b)
O₂_{sc_b}=(O₂_b/sumatoria_sincenizas_b)
H₂O_{sc_b}=(H₂O_b/sumatoria_sincenizas_b)
S_{sc_b}=(S_b/sumatoria_sincenizas_b)

P_{comb}=C_{sc_b}+H₂_{sc_b}+O₂_{sc_b}+H₂O_{sc_b}+S_{sc_b}

"BASE MOLAR BAGAZO SIN CENIZAS"

Kmol_{C_sc_b}=(C_{sc_b})/12
Kmol_{H_2_sc_b}=(H₂_{sc_b})/2
Kmol_{O_2_sc_b}=(O₂_{sc_b})/32
Kmol_{H2O_sc_b}=(H₂O_{sc_b})/18
Kmol_{S_sc_b}=(S_{sc_b})/32

sumatoria_Kmol_sc_b=Kmol_{C_sc_b}+Kmol_{H_2_sc_b}+Kmol_{O_2_sc_b}+Kmol_{H2O_sc_b}+Kmol_{S_sc_b}

SIGMA_{Y_sc_b}=Y_{C_sc_b}+Y_{H_2_sc_b}+Y_{O_2_sc_b}+Y_{H2O_sc_b}+Y_{S_sc_b}

"FRACCIÓN MOLAR BAGAZO SIN CENIZAS"

Y_{C_sc_b}=Kmol_{C_sc_b}/sumatoria_Kmol_sc_b

$Y_{H_2O_sc_b} = K_{mol_H_2O_sc_b} / \text{sumatoria_Kmol_sc_b}$
 $Y_{O_2_sc_b} = K_{mol_O_2_sc_b} / \text{sumatoria_Kmol_sc_b}$
 $Y_{H_2O_sc_b} = K_{mol_H_2O_sc_b} / \text{sumatoria_Kmol_sc_b}$
 $Y_{S_sc_b} = K_{mol_S_sc_b} / \text{sumatoria_Kmol_sc_b}$

"CARBON"

"COMPOSICIÓN CARBON"

$H_2O_c = 0,0783$
 $cenizas_c = 0,2182$
 $C_c = 0,4918$
 $H_2_c = 0,0416$
 $O_2_c = 0,1329$
 $N_2_c = 0,0172$
 $S_c = 0,02$

$\text{sumatoria_sincenizas_c} = H_2O_c + C_c + H_2_c + O_2_c + N_2_c + S_c$

$\text{sumatoria_sinhumedad_c} = cenizas_c + C_c + H_2_c + O_2_c + N_2_c + S_c$

"COMPOSICION DEL CARBON EN BASE SECA "

$cenizas_sh_c = (cenizas_c / \text{sumatoria_sinhumedad_c})$
 $C_sh_c = (C_c / \text{sumatoria_sinhumedad_c})$
 $H_2_sh_c = (H_2_c / \text{sumatoria_sinhumedad_c})$
 $O_2_sh_c = (O_2_c / \text{sumatoria_sinhumedad_c})$
 $N_2_sh_c = (N_2_c / \text{sumatoria_sinhumedad_c})$
 $S_sh_c = (S_c / \text{sumatoria_sinhumedad_c})$

"COMPOSICIÓN CARBON SIN CENIZAS"

$C_sc_c = (C_c / \text{sumatoria_sincenizas_c})$
 $H_2_sc_c = (H_2_c / \text{sumatoria_sincenizas_c})$
 $O_2_sc_c = (O_2_c / \text{sumatoria_sincenizas_c})$
 $H_2O_sc_c = (H_2O_c / \text{sumatoria_sincenizas_c})$
 $N_2_sc_c = (N_2_c / \text{sumatoria_sincenizas_c})$
 $S_sc_c = (S_c / \text{sumatoria_sincenizas_c})$

"BASE MOLAR CARBON SIN CENIZAS"

$K_{mol_C_sc_c} = (C_sc_c) / 12$
 $K_{mol_H_2_sc_c} = (H_2_sc_c) / 2$
 $K_{mol_O_2_sc_c} = (O_2_sc_c) / 32$
 $K_{mol_H_2O_sc_c} = (H_2O_sc_c) / 18$
 $K_{mol_N_2_sc_c} = (N_2_sc_c) / 28$
 $K_{mol_S_sc_c} = (S_sc_c) / 32$

$\text{sumatoria_Kmol_sc_c} = K_{mol_C_sc_c} + K_{mol_H_2_sc_c} + K_{mol_O_2_sc_c} + K_{mol_H_2O_sc_c} + K_{mol_N_2_sc_c} + K_{mol_S_sc_c}$

"FRACCIÓN MOLAR CARBON SIN CENIZAS"

$Y_{C_sc_c} = K_{mol_C_sc_c} / \text{sumatoria_Kmol_sc_c}$
 $Y_{H_2_sc_c} = K_{mol_H_2_sc_c} / \text{sumatoria_Kmol_sc_c}$

$$Y_{O_2_sc_c} = K_{mol_O_2_sc_c} / \text{sumatoria_Kmol_sc_c}$$

$$Y_{H_2O_sc_c} = K_{mol_H_2O_sc_c} / \text{sumatoria_Kmol_sc_c}$$

$$Y_{N_2_sc_c} = K_{mol_N_2_sc_c} / \text{sumatoria_Kmol_sc_c}$$

$$Y_{S_sc_c} = K_{mol_S_sc_c} / \text{sumatoria_Kmol_sc_c}$$

$$\text{SIGMA_Y_sc_c} = Y_{C_sc_c} + Y_{H_2_sc_c} + Y_{O_2_sc_c} + Y_{H_2O_sc_c} + Y_{N_2_sc_c} + Y_{S_sc_c}$$

"COMBUSTIÓN IDEAL"

"(POR_b (C + H₂ + O₂ + 0 N + 0 S + H₂O)_{Bagazo} + POR_C (C + H₂ + O₂ + N + S + H₂O)_{carbon}) + a_t (O₂ + 3,76 N₂) -----> X CO₂ + Y H₂O + Z N₂ + W SO₂ "

$$\text{POR}_b * Y_{C_sc_b} + \text{POR}_c * Y_{C_sc_c} = X \text{ "Balance de C"}$$

$$\text{POR}_b * (2 * Y_{H_2_sc_b}) + \text{POR}_c * (2 * Y_{H_2_sc_c}) + \text{POR}_b * (2 * Y_{H_2O_sc_b}) + \text{POR}_c * (2 * Y_{H_2O_sc_c}) = 2 * Y \text{ "Balance de H"}$$

$$\text{POR}_b * (2 * Y_{O_2_sc_b}) + \text{POR}_b * (Y_{H_2O_sc_b}) + \text{POR}_c * (2 * Y_{O_2_sc_c}) + \text{POR}_c * (Y_{H_2O_sc_c}) + (2 * a_t) = (2 * X) + Y + (2 * W) \text{ "Balance de O"}$$

$$\text{POR}_c * (Y_{N_2_sc_c}) + (a_t * 2 * 3,76) = 2 * Z \text{ "Balance de N"}$$

$$\text{POR}_b * (Y_{S_sc_b}) + \text{POR}_c * (Y_{S_sc_c}) = W \text{ "Balance de S"}$$

$$\text{POR}_b = 0$$

$$\text{POR}_c = 1 - \text{POR}_b$$

"RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE"

$$M_{mezcla} = \text{POR}_b * ((12 * Y_{C_sc_b}) + (2 * Y_{H_2_sc_b}) + (32 * Y_{O_2_sc_b}) + (18 * Y_{H_2O_sc_b}) + (32 * Y_{S_sc_b})) + \text{POR}_c * ((12 * Y_{C_sc_c}) + (2 * Y_{H_2_sc_c}) + (32 * Y_{O_2_sc_c}) + (18 * Y_{H_2O_sc_c}) + (28 * Y_{N_2_sc_c}) + (32 * Y_{S_sc_c}))$$

$$P_{Molecular_Comb} = \text{POR}_b * ((12 * C_{sc_b}) + (2 * H_{2_sc_b}) + (32 * O_{2_sc_b}) + (18 * H_{2O_sc_b}) + (32 * S_{sc_b})) + \text{POR}_c * ((12 * C_{sc_c}) + (2 * H_{2_sc_c}) + (32 * O_{2_sc_c}) + (18 * H_{2O_sc_c}) + (28 * N_{2_sc_c}) + (32 * S_{sc_c}))$$

$$AC_t = (a_t * 4,76 * 28,64) / (1 * M_{mezcla})$$

"Poder calorífico Combustible (Mezcla)"

$$PC = (X * (-393520) + Y * (-241820)) - (\text{POR}_b * Y_{H_2O_sc_b} * (-285830) + \text{POR}_c * Y_{H_2O_sc_c} * (-285830))$$

$$PC_{masa} = PC / M_{mezcla}$$

"COMBUSTION REAL"

"Exceso de aire 30%"

"Factor de aireación"

$$n_{aireacion} = 1,3$$

" ((C + H₂ + O₂ + 0 N + 0 S + H₂O)_{Bagazo} + (C + H₂ + O₂ + N + S + H₂O)_{carbon}) + a (O₂ + 3,76 N₂) -----> T CO₂ + V H₂O + J N₂ + R CO + U O₂ + I SO₂ "

$$a=n_{\text{aireacion}}*a_t$$

$$\text{POR}_b*Y_{C_sc_b}+\text{POR}_c*Y_{C_sc_c}=T+R \text{ "Balance de C"}$$

$$\text{POR}_b*(2*Y_{H_2_sc_b})+\text{POR}_c*(2*Y_{H_2_sc_c})+\text{POR}_b*(2*Y_{H2O_sc_b})+\text{POR}_c*(2*Y_{H2O_sc_c})=2*V \text{ "Balance de H"}$$

$$\text{POR}_b*(2*Y_{O_2_sc_b})+\text{POR}_b*(Y_{H2O_sc_b})+\text{POR}_c*(2*Y_{O_2_sc_c})+\text{POR}_c*(Y_{H2O_sc_c})+(2*a)=(2*T)+V+R+(2*U)+(2*I) \text{ "Balance de O"}$$

$$\text{POR}_b*(Y_{S_sc_b})+\text{POR}_c*(Y_{S_sc_c})=I \text{ "Balance de S"}$$

$$\text{POR}_c*(Y_{N_2_sc_c})+(a*2*3,76)=2*J \text{ "Balance de N"}$$

$$(R/T)=0,02 \text{ "Relación CO/CO2"}$$

"Cantidad de aire seco"

$$\text{aire_seco}=a*4,76*28,84$$
$$\text{Ac_real}=\text{aire_seco}/(1*M_{\text{mezcla}})$$

"cantidad de humedad con el aire"

$$(N_v/N_{\text{aire}}+N_v)=(P_v/P_m)$$

"presion de vapor $P_v = \phi * P_{\text{sat}}$ "

$$P_{\text{sat_@T_aire}}=p_{\text{sat}}(\text{Water}, T=25,56)$$
$$\phi=0,70 \text{ "Humedad relativa en el valle del cauca"}$$
$$P_v=\phi*P_{\text{sat_@T_aire}}$$
$$P_m=100$$
$$N_{\text{aire}}=a*4,76$$

ANEXO B. BALANCE ENERGETICO DE LA CALDERA ACUOTUBULAR

"BALANCE DE ENERGIA"

"BLOQUE #2 BANCO PRINCIPAL"

"DATOS"

$$T_{12M}=1442$$
$$c_p=1,25$$
$$m_{\text{gasesM}}=107,84$$
$$h_{5M}=2766,68$$
$$h_{2M}=739,57$$
$$h_{12M}=2110$$
$$m_{\text{aguaM}}=46,27$$
$$m_{\text{purgaM}}=0,45$$
$$h_{\text{purgaM}}=1289,79$$

$$m_{\text{aguaM}}*(h_{5M}-h_{2M})=m_{\text{gasesM}}*(h_{12M}-h_{13M})-(m_{\text{purgaM}}*h_{\text{purgaM}})$$

"BLOQUE #3 y #4 SUPERCALENTADORES "

"SUPERCALENTADOR # II"

"DATOS"

$m_{\text{vaporM}}=45,81$

$h_{5.1M}=3147$

$h_{7M}=3444$

$$m_{\text{vaporM}}(h_{5.1M}-h_{7M})=m_{\text{gasesM}}(h_{14M}-h_{13M})$$

"Supercalentador # I"

$$m_{\text{vaporM}}(h_{5M}-h_{5.1M})=m_{\text{gasesM}}(h_{15M}-h_{14M})$$

"BLOQUE #5 CALENTADOR AIRE SOBRE FUEGO"

"DATOS"

$m_{\text{aire_secundario}}=21,60$

$h_{9.1M}=298,16$

$h_{9M}=659,09$

$$m_{\text{aire_secundario}}(h_{9.1M}-h_{9M})=m_{\text{gasesM}}(h_{16M}-h_{15M})$$

"BLOQUE #6 CALENTADOR AIRE FORZADO"

"DATOS"

$m_{\text{aire_primario}}=53,62$

$h_{10.1M}=298,16$

$h_{10M}=517,58$

$$m_{\text{aire_primario}}(h_{10.1M}-h_{10M})=m_{\text{gasesM}}(h_{17M}-h_{16M})$$

"BLOQUE #7 ECONOMIZADOR"

"DATOS"

$h_{1M}=478,52$

$$m_{\text{aguaM}}(h_{1M}-h_{2M})=m_{\text{gasesM}}(h_{18M}-h_{17M})$$

$Pot=cp*m_{\text{gasesM}}*T_{12M}$

$Pot=(m_{\text{comb}}+(Ac_{\text{real}}*m_{\text{comb}}))*cp*T_{12M}$

$Ac_{\text{real}}=(m_{\text{aire}}/m_{\text{comb}})$

"BLOQUE #1 CAMARA DE COMBUSTION"

$$(m_{\text{comb}} \cdot PC_{\text{masa}}) + (m_{\text{aire_secundario}} \cdot h_{9M}) + (m_{\text{aire_primario}} \cdot h_{10M}) + (m_{\text{aire}} \cdot h_{\text{aire}}) = (m_{\text{gasesM}} \cdot h_{12M})$$

$$m_{\text{comb_hora}} = m_{\text{comb}} \cdot 3600$$

ANEXO C. EFICIENCIA DE LA CALDERA ACUOTUBULAR

"EFICIENCIA"

$$\begin{aligned} \text{Pot_util_caldera} &= m_{\text{aguaM}} \cdot (h_{7M} - h_{1M}) \\ \text{Pot_termica_caldera} &= m_{\text{comb}} \cdot \text{abs}(PC_{\text{masa}}) \\ n_{\text{caldera}} &= (\text{Pot_util_caldera} / \text{Pot_termica_caldera}) \end{aligned}$$

ANEXO D. BALANCE EXERGETICO DE LA CALDERA ACUOTUBULAR

"EXERGIA"

" EXERGIA QUIMICA"

"REACTIVOS "

$$\begin{aligned} E_{\text{CHON}} &= \text{POR}_b \cdot (1,0438 + ((0,1882 \cdot H_{2_sh_b} / C_{sh_b}) - (0,2509 \cdot (1 + 0,7256 \cdot H_{2_sh_b} / C_{sh_b})))) / (1 - (0,3035 \cdot O_{2_sh_b} / C_{sh_b}) + \text{POR}_c \cdot (1,0437 + (((0,1882 \cdot H_{2_sh_c}) + (0,0610 \cdot O_{2_sh_c}) + (0,0404 \cdot N_{2_sh_c})) / (C_{sh_c}))) \\ E_S &= \text{POR}_c \cdot (598850 \cdot Y_{S_sc_c}) \\ E_{H_2O} &= \text{POR}_b \cdot (3120 \cdot Y_{H_2O_sc_b}) + \text{POR}_c \cdot (3120 \cdot Y_{H_2O_sc_c}) \end{aligned}$$

$$\text{Exergia_Q_reactivos} = (E_{\text{CHON}}) \cdot \text{abs}(PC)$$

"FRACCIONES MOLARES DE LOS PRODUCTOS"

$$\begin{aligned} \text{FM}_{CO_2p} &= T / (T + V + J + R + U + I) \\ \text{FM}_{H_2Op} &= V / (T + V + J + R + U + I) \\ \text{FM}_{N_2p} &= J / (T + V + J + R + U + I) \\ \text{FM}_{COp} &= R / (T + V + J + R + U + I) \\ \text{FM}_{O_2p} &= U / (T + V + J + R + U + I) \\ \text{FM}_{SO_2p} &= I / (T + V + J + R + U + I) \end{aligned}$$

"PRODUCTOS"

$$\begin{aligned} E_{co_2p} &= \text{FM}_{CO_2p} \cdot 20140 + 8,314 \cdot 298 \cdot \text{FM}_{CO_2p} \cdot \ln(\text{FM}_{CO_2p}) \\ E_{h_2op} &= \text{FM}_{H_2Op} \cdot 11710 + 8,314 \cdot 298 \cdot \text{FM}_{H_2Op} \cdot \ln(\text{FM}_{H_2Op}) \\ E_{n_2p} &= \text{FM}_{N_2p} \cdot 720 + 8,314 \cdot 298 \cdot \text{FM}_{N_2p} \cdot \ln(\text{FM}_{N_2p}) \\ E_{cop} &= \text{FM}_{COp} \cdot 275430 + 8,314 \cdot 298 \cdot \text{FM}_{COp} \cdot \ln(\text{FM}_{COp}) \\ E_{o_2p} &= \text{FM}_{O_2p} \cdot 3970 + 8,314 \cdot 298 \cdot \text{FM}_{O_2p} \cdot \ln(\text{FM}_{O_2p}) \\ E_{so_2p} &= \text{FM}_{SO_2p} \cdot 303500 + 8,314 \cdot 298 \cdot \text{FM}_{SO_2p} \cdot \ln(\text{FM}_{SO_2p}) \end{aligned}$$

$$\text{Exergia_productos} = E_{co_2p} + E_{h_2op} + E_{n_2p} + E_{cop} + E_{o_2p} + E_{so_2p}$$

$$\text{Exergia_quimica_total} = \text{Exergia_Q_reactivos} - \text{Exergia_productos}$$

"EXERGIA FISICA"

"MOLES DE COMBUSTIBLE"

moles_comb=(m_comb/P_Molecular_Comb)

" PRESION DE CADA COMPONENTE "

P_CO2=(T/T+V+J+R+U+I)*100

P_H2O=(V/T+V+J+R+U+I)*100

P_N2=(J/T+V+J+R+U+I)*100

P_CO=(R/T+V+J+R+U+I)*100

P_O2=(U/T+V+J+R+U+I)*100

P_SO2=(I/T+V+J+R+U+I)*100

"

ENTALPIA A TEMPERATURA AMBIENTE"

T_AMB=25

h_CO2_AMB=cp(CO2;T=T_AMB)*T_AMB

h_H2O_AMB=cp(H2O;T=T_AMB)*T_AMB

h_N2_AMB=cp(N2;T=T_AMB)*T_AMB

h_CO_AMB=cp(CO;T=T_AMB)*T_AMB

h_O2_AMB=cp(O2;T=T_AMB)*T_AMB

h_SO2_AMB=cp(SO2;T=T_AMB)*T_AMB

"ENTROPIA A TEMPERATURA AMBIENTE"

P_AMB=100

s_CO2_AMB=entropy(CO2;T=T_AMB;P=P_AMB)

s_H2O_AMB=entropy(H2O;T=T_AMB;P=P_AMB)

s_N2_AMB=entropy(N2;T=T_AMB;P=P_AMB)

s_CO_AMB=entropy(CO;T=T_AMB;P=P_AMB)

s_O2_AMB=entropy(O2;T=T_AMB;P=P_AMB)

s_SO2_AMB=entropy(SO2;T=T_AMB;P=P_AMB)

"ENTALPIA EN EL PUNTO 12"

h_CO2_12M=cp(CO2;T=T_12M)*T_12M

h_H2O_12M=cp(H2O;T=T_12M)*T_12M

h_N2_12M=cp(N2;T=T_12M)*T_12M

h_CO_12M=cp(CO;T=T_12M)*T_12M

h_O2_12M=cp(O2;T=T_12M)*T_12M

h_SO2_12M=cp(SO2;T=T_12M)*T_12M

"ENTROPIA EN EL PUNTO 12"

s_CO2_12M=entropy(CO2;T=T_12M;P=P_CO2)

s_H2O_12M=entropy(H2O;T=T_12M;P=P_H2O)

s_N2_12M=entropy(N2;T=T_12M;P=P_N2)

s_CO_12M=entropy(CO;T=T_12M;P=P_CO)

s_O2_12M=entropy(O2;T=T_12M;P=P_O2)

s_SO2_12M=entropy(SO2;T=T_12M;P=P_SO2)

"EXERGIA EN PUNTO 12"

$$\begin{aligned} \text{Exergia_CO2_12M} &= ((h_{\text{CO2_12M}} - h_{\text{CO2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{CO2_12M}} - s_{\text{CO2_AMB}})) * 44 \\ \text{Exergia_H2O_12M} &= ((h_{\text{H2O_12M}} - h_{\text{H2O_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{H2O_12M}} - s_{\text{H2O_AMB}})) * 18 \\ \text{Exergia_N2_12M} &= ((h_{\text{N2_12M}} - h_{\text{N2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{N2_12M}} - s_{\text{N2_AMB}})) * 28 \\ \text{Exergia_CO_12M} &= ((h_{\text{CO_12M}} - h_{\text{CO_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{CO_12M}} - s_{\text{CO_AMB}})) * 28 \\ \text{Exergia_O2_12M} &= ((h_{\text{O2_12M}} - h_{\text{O2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{O2_12M}} - s_{\text{O2_AMB}})) * 32 \\ \text{Exergia_SO2_12M} &= ((h_{\text{SO2_12M}} - h_{\text{SO2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{SO2_12M}} - s_{\text{SO2_AMB}})) * 64 \end{aligned}$$

$$\text{Exergia_fisica_12M} = \text{FM_CO2p} * \text{Exergia_CO2_12M} + \text{FM_H2Op} * \text{Exergia_H2O_12M} + \text{FM_N2p} * \text{Exergia_N2_12M} + \text{FM_COp} * \text{Exergia_CO_12M} + \text{FM_O2p} * \text{Exergia_O2_12M} + \text{FM_SO2p} * \text{Exergia_SO2_12M}$$

$$\text{Exergia_total_12} = \text{moles_comb} * (\text{Exergia_quimica_total} + \text{Exergia_fisica_12M})$$

"ENTALPIA EN EL PUNTO 13"

$$\begin{aligned} h_{\text{CO2_13M}} &= \text{cp}(\text{CO2}; T=T_{\text{13M}}) * T_{\text{13M}} \\ h_{\text{H2O_13M}} &= \text{cp}(\text{H2O}; T=T_{\text{13M}}) * T_{\text{13M}} \\ h_{\text{N2_13M}} &= \text{cp}(\text{N2}; T=T_{\text{13M}}) * T_{\text{13M}} \\ h_{\text{CO_13M}} &= \text{cp}(\text{CO}; T=T_{\text{13M}}) * T_{\text{13M}} \\ h_{\text{O2_13M}} &= \text{cp}(\text{O2}; T=T_{\text{13M}}) * T_{\text{13M}} \\ h_{\text{SO2_13M}} &= \text{cp}(\text{SO2}; T=T_{\text{13M}}) * T_{\text{13M}} \end{aligned}$$

"ENTROPIA EN EL PUNTO 13"

$$T_{\text{13M}} = (h_{\text{13M}} / \text{cp}) - 273$$

$$\begin{aligned} s_{\text{CO2_13M}} &= \text{entropy}(\text{CO2}; T=T_{\text{13M}}; P=P_{\text{CO2}}) \\ s_{\text{H2O_13M}} &= \text{entropy}(\text{H2O}; T=T_{\text{13M}}; P=P_{\text{H2O}}) \\ s_{\text{N2_13M}} &= \text{entropy}(\text{N2}; T=T_{\text{13M}}; P=P_{\text{N2}}) \\ s_{\text{CO_13M}} &= \text{entropy}(\text{CO}; T=T_{\text{13M}}; P=P_{\text{CO}}) \\ s_{\text{O2_13M}} &= \text{entropy}(\text{O2}; T=T_{\text{13M}}; P=P_{\text{O2}}) \\ s_{\text{SO2_13M}} &= \text{entropy}(\text{SO2}; T=T_{\text{13M}}; P=P_{\text{SO2}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Exergia_CO2_13M} &= ((h_{\text{CO2_13M}} - h_{\text{CO2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{CO2_13M}} - s_{\text{CO2_AMB}})) * 44 \\ \text{Exergia_H2O_13M} &= ((h_{\text{H2O_13M}} - h_{\text{H2O_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{H2O_13M}} - s_{\text{H2O_AMB}})) * 18 \\ \text{Exergia_N2_13M} &= ((h_{\text{N2_13M}} - h_{\text{N2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{N2_13M}} - s_{\text{N2_AMB}})) * 28 \\ \text{Exergia_CO_13M} &= ((h_{\text{CO_13M}} - h_{\text{CO_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{CO_13M}} - s_{\text{CO_AMB}})) * 28 \\ \text{Exergia_O2_13M} &= ((h_{\text{O2_13M}} - h_{\text{O2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{O2_13M}} - s_{\text{O2_AMB}})) * 32 \\ \text{Exergia_SO2_13M} &= ((h_{\text{SO2_13M}} - h_{\text{SO2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{SO2_13M}} - s_{\text{SO2_AMB}})) * 64 \end{aligned}$$

$$\text{Exergia_fisica_13M} = \text{FM_CO2p} * \text{Exergia_CO2_13M} + \text{FM_H2Op} * \text{Exergia_H2O_13M} + \text{FM_N2p} * \text{Exergia_N2_13M} + \text{FM_COp} * \text{Exergia_CO_13M} + \text{FM_O2p} * \text{Exergia_O2_13M} + \text{FM_SO2p} * \text{Exergia_SO2_13M}$$

$$\text{Exergia_total_13} = \text{moles_comb} * (\text{Exergia_quimica_total} + \text{Exergia_fisica_13M})$$

"ENTALPIA EN EL PUNTO 14"

$$\begin{aligned} h_{\text{CO2_14M}} &= \text{cp}(\text{CO2}; T=T_{\text{14M}}) * T_{\text{14M}} \\ h_{\text{H2O_14M}} &= \text{cp}(\text{H2O}; T=T_{\text{14M}}) * T_{\text{14M}} \\ h_{\text{N2_14M}} &= \text{cp}(\text{N2}; T=T_{\text{14M}}) * T_{\text{14M}} \\ h_{\text{CO_14M}} &= \text{cp}(\text{CO}; T=T_{\text{14M}}) * T_{\text{14M}} \\ h_{\text{O2_14M}} &= \text{cp}(\text{O2}; T=T_{\text{14M}}) * T_{\text{14M}} \end{aligned}$$

$$h_{SO2_14M} = cp(SO2; T=T_{14M}) * T_{14M}$$

"ENTROPIA EN EL PUNTO 14"

$$T_{14M} = (h_{14M}/cp) - 273$$

$$s_{CO2_14M} = entropy(CO2; T=T_{14M}; P=P_{CO2})$$

$$s_{H2O_14M} = entropy(H2O; T=T_{14M}; P=P_{H2O})$$

$$s_{N2_14M} = entropy(N2; T=T_{14M}; P=P_{N2})$$

$$s_{CO_14M} = entropy(CO; T=T_{14M}; P=P_{CO})$$

$$s_{O2_14M} = entropy(O2; T=T_{14M}; P=P_{O2})$$

$$s_{SO2_14M} = entropy(SO2; T=T_{14M}; P=P_{SO2})$$

$$Exergia_{CO2_14M} = ((h_{CO2_14M} - h_{CO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO2_14M} - s_{CO2_AMB})) * 44$$

$$Exergia_{H2O_14M} = ((h_{H2O_14M} - h_{H2O_AMB}) - T_{AMB} * (s_{H2O_14M} - s_{H2O_AMB})) * 18$$

$$Exergia_{N2_14M} = ((h_{N2_14M} - h_{N2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{N2_14M} - s_{N2_AMB})) * 28$$

$$Exergia_{CO_14M} = ((h_{CO_14M} - h_{CO_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO_14M} - s_{CO_AMB})) * 28$$

$$Exergia_{O2_14M} = ((h_{O2_14M} - h_{O2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{O2_14M} - s_{O2_AMB})) * 32$$

$$Exergia_{SO2_14M} = ((h_{SO2_14M} - h_{SO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{SO2_14M} - s_{SO2_AMB})) * 64$$

$$Exergia_{fisica_14M} = FM_{CO2p} * Exergia_{CO2_14M} + FM_{H2Op} * Exergia_{H2O_14M} + FM_{N2p} * Exergia_{N2_14M} + FM_{COp} * Exergia_{CO_14M} + FM_{O2p} * Exergia_{O2_14M} + FM_{SO2p} * Exergia_{SO2_14M}$$

$$Exergia_{total_14} = moles_{comb} * (Exergia_{quimica_total} + Exergia_{fisica_14M})$$

"ENTALPIA EN EL PUNTO 15"

$$h_{CO2_15M} = cp(CO2; T=T_{15M}) * T_{15M}$$

$$h_{H2O_15M} = cp(H2O; T=T_{15M}) * T_{15M}$$

$$h_{N2_15M} = cp(N2; T=T_{15M}) * T_{15M}$$

$$h_{CO_15M} = cp(CO; T=T_{15M}) * T_{15M}$$

$$h_{O2_15M} = cp(O2; T=T_{15M}) * T_{15M}$$

$$h_{SO2_15M} = cp(SO2; T=T_{15M}) * T_{15M}$$

"ENTROPIA EN EL PUNTO 15"

$$T_{15M} = (h_{15M}/cp) - 273$$

$$s_{CO2_15M} = entropy(CO2; T=T_{15M}; P=P_{CO2})$$

$$s_{H2O_15M} = entropy(H2O; T=T_{15M}; P=P_{H2O})$$

$$s_{N2_15M} = entropy(N2; T=T_{15M}; P=P_{N2})$$

$$s_{CO_15M} = entropy(CO; T=T_{15M}; P=P_{CO})$$

$$s_{O2_15M} = entropy(O2; T=T_{15M}; P=P_{O2})$$

$$s_{SO2_15M} = entropy(SO2; T=T_{15M}; P=P_{SO2})$$

$$Exergia_{CO2_15M} = ((h_{CO2_15M} - h_{CO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO2_15M} - s_{CO2_AMB})) * 44$$

$$Exergia_{H2O_15M} = ((h_{H2O_15M} - h_{H2O_AMB}) - T_{AMB} * (s_{H2O_15M} - s_{H2O_AMB})) * 18$$

$$Exergia_{N2_15M} = ((h_{N2_15M} - h_{N2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{N2_15M} - s_{N2_AMB})) * 28$$

$$Exergia_{CO_15M} = ((h_{CO_15M} - h_{CO_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO_15M} - s_{CO_AMB})) * 28$$

$$Exergia_{O2_15M} = ((h_{O2_15M} - h_{O2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{O2_15M} - s_{O2_AMB})) * 32$$

$$Exergia_{SO2_15M} = ((h_{SO2_15M} - h_{SO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{SO2_15M} - s_{SO2_AMB})) * 64$$

$$Exergia_{fisica_15M} = FM_{CO2p} * Exergia_{CO2_15M} + FM_{H2Op} * Exergia_{H2O_15M} + FM_{N2p} * Exergia_{N2_15M} + FM_{COp} * Exergia_{CO_15M} + FM_{O2p} * Exergia_{O2_15M} + FM_{SO2p} * Exergia_{SO2_15M}$$

$$\text{Exergía_total_15} = \text{moles_comb} * (\text{Exergía_química_total} + \text{Exergía_física_15M})$$

"ENTALPIA EN EL PUNTO 16"

$$\begin{aligned} h_{\text{CO2_16M}} &= \text{cp}(\text{CO2}; T=T_{16M}) * T_{16M} \\ h_{\text{H2O_16M}} &= \text{cp}(\text{H2O}; T=T_{16M}) * T_{16M} \\ h_{\text{N2_16M}} &= \text{cp}(\text{N2}; T=T_{16M}) * T_{16M} \\ h_{\text{CO_16M}} &= \text{cp}(\text{CO}; T=T_{16M}) * T_{16M} \\ h_{\text{O2_16M}} &= \text{cp}(\text{O2}; T=T_{16M}) * T_{16M} \\ h_{\text{SO2_16M}} &= \text{cp}(\text{SO2}; T=T_{16M}) * T_{16M} \end{aligned}$$

"ENTROPIA EN EL PUNTO 16"

$$T_{16M} = (h_{16M}/cp) - 273$$

$$\begin{aligned} s_{\text{CO2_16M}} &= \text{entropy}(\text{CO2}; T=T_{16M}; P=P_{\text{CO2}}) \\ s_{\text{H2O_16M}} &= \text{entropy}(\text{H2O}; T=T_{16M}; P=P_{\text{H2O}}) \\ s_{\text{N2_16M}} &= \text{entropy}(\text{N2}; T=T_{16M}; P=P_{\text{N2}}) \\ s_{\text{CO_16M}} &= \text{entropy}(\text{CO}; T=T_{16M}; P=P_{\text{CO}}) \\ s_{\text{O2_16M}} &= \text{entropy}(\text{O2}; T=T_{16M}; P=P_{\text{O2}}) \\ s_{\text{SO2_16M}} &= \text{entropy}(\text{SO2}; T=T_{16M}; P=P_{\text{SO2}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Exergía_CO2_16M} &= ((h_{\text{CO2_16M}} - h_{\text{CO2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{CO2_16M}} - s_{\text{CO2_AMB}})) * 44 \\ \text{Exergía_H2O_16M} &= ((h_{\text{H2O_16M}} - h_{\text{H2O_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{H2O_16M}} - s_{\text{H2O_AMB}})) * 18 \\ \text{Exergía_N2_16M} &= ((h_{\text{N2_16M}} - h_{\text{N2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{N2_16M}} - s_{\text{N2_AMB}})) * 28 \\ \text{Exergía_CO_16M} &= ((h_{\text{CO_16M}} - h_{\text{CO_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{CO_16M}} - s_{\text{CO_AMB}})) * 28 \\ \text{Exergía_O2_16M} &= ((h_{\text{O2_16M}} - h_{\text{O2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{O2_16M}} - s_{\text{O2_AMB}})) * 32 \\ \text{Exergía_SO2_16M} &= ((h_{\text{SO2_16M}} - h_{\text{SO2_AMB}}) - T_{\text{AMB}} * (s_{\text{SO2_16M}} - s_{\text{SO2_AMB}})) * 64 \end{aligned}$$

$$\text{Exergía_física_16M} = \text{FM}_{\text{CO2p}} * \text{Exergía_CO2_16M} + \text{FM}_{\text{H2Op}} * \text{Exergía_H2O_16M} + \text{FM}_{\text{N2p}} * \text{Exergía_N2_16M} + \text{FM}_{\text{COp}} * \text{Exergía_CO_16M} + \text{FM}_{\text{O2p}} * \text{Exergía_O2_16M} + \text{FM}_{\text{SO2p}} * \text{Exergía_SO2_16M}$$

$$\text{Exergía_total_16} = \text{moles_comb} * (\text{Exergía_química_total} + \text{Exergía_física_16M})$$

"ENTALPIA EN EL PUNTO 17"

$$\begin{aligned} h_{\text{CO2_17M}} &= \text{cp}(\text{CO2}; T=T_{17M}) * T_{17M} \\ h_{\text{H2O_17M}} &= \text{cp}(\text{H2O}; T=T_{17M}) * T_{17M} \\ h_{\text{N2_17M}} &= \text{cp}(\text{N2}; T=T_{17M}) * T_{17M} \\ h_{\text{CO_17M}} &= \text{cp}(\text{CO}; T=T_{17M}) * T_{17M} \\ h_{\text{O2_17M}} &= \text{cp}(\text{O2}; T=T_{17M}) * T_{17M} \\ h_{\text{SO2_17M}} &= \text{cp}(\text{SO2}; T=T_{17M}) * T_{17M} \end{aligned}$$

"ENTROPIA EN EL PUNTO 17"

$$T_{17M} = (h_{17M}/cp) - 273$$

$$\begin{aligned} s_{\text{CO2_17M}} &= \text{entropy}(\text{CO2}; T=T_{17M}; P=P_{\text{CO2}}) \\ s_{\text{H2O_17M}} &= \text{entropy}(\text{H2O}; T=T_{17M}; P=P_{\text{H2O}}) \\ s_{\text{N2_17M}} &= \text{entropy}(\text{N2}; T=T_{17M}; P=P_{\text{N2}}) \\ s_{\text{CO_17M}} &= \text{entropy}(\text{CO}; T=T_{17M}; P=P_{\text{CO}}) \\ s_{\text{O2_17M}} &= \text{entropy}(\text{O2}; T=T_{17M}; P=P_{\text{O2}}) \end{aligned}$$

$$s_{SO2_17M} = \text{entropy}(SO2; T=T_{17M}; P=P_{SO2})$$

$$\begin{aligned} \text{Exergia_CO2_17M} &= ((h_{CO2_17M} - h_{CO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO2_17M} - s_{CO2_AMB})) * 44 \\ \text{Exergia_H2O_17M} &= ((h_{H2O_17M} - h_{H2O_AMB}) - T_{AMB} * (s_{H2O_17M} - s_{H2O_AMB})) * 18 \\ \text{Exergia_N2_17M} &= ((h_{N2_17M} - h_{N2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{N2_17M} - s_{N2_AMB})) * 28 \\ \text{Exergia_CO_17M} &= ((h_{CO_17M} - h_{CO_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO_17M} - s_{CO_AMB})) * 28 \\ \text{Exergia_O2_17M} &= ((h_{O2_17M} - h_{O2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{O2_17M} - s_{O2_AMB})) * 32 \\ \text{Exergia_SO2_17M} &= ((h_{SO2_17M} - h_{SO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{SO2_17M} - s_{SO2_AMB})) * 64 \end{aligned}$$

$$\text{Exergia_fisica_17M} = FM_{CO2p} * \text{Exergia_CO2_17M} + FM_{H2Op} * \text{Exergia_H2O_17M} + FM_{N2p} * \text{Exergia_N2_17M} + FM_{COp} * \text{Exergia_CO_17M} + FM_{O2p} * \text{Exergia_O2_17M} + FM_{SO2p} * \text{Exergia_SO2_17M}$$

$$\text{Exergia_total_17} = \text{moles_comb} * (\text{Exergia_quimica_total} + \text{Exergia_fisica_17M})$$

"ENTALPIA EN EL PUNTO 18"

$$\begin{aligned} h_{CO2_18M} &= \text{cp}(CO2; T=T_{18M}) * T_{18M} \\ h_{H2O_18M} &= \text{cp}(H2O; T=T_{18M}) * T_{18M} \\ h_{N2_18M} &= \text{cp}(N2; T=T_{18M}) * T_{18M} \\ h_{CO_18M} &= \text{cp}(CO; T=T_{18M}) * T_{18M} \\ h_{O2_18M} &= \text{cp}(O2; T=T_{18M}) * T_{18M} \\ h_{SO2_18M} &= \text{cp}(SO2; T=T_{18M}) * T_{18M} \end{aligned}$$

"ENTROPIA EN EL PUNTO 18"

$$T_{18M} = (h_{18M}/cp) - 273$$

$$\begin{aligned} s_{CO2_18M} &= \text{entropy}(CO2; T=T_{18M}; P=P_{CO2}) \\ s_{H2O_18M} &= \text{entropy}(H2O; T=T_{18M}; P=P_{H2O}) \\ s_{N2_18M} &= \text{entropy}(N2; T=T_{18M}; P=P_{N2}) \\ s_{CO_18M} &= \text{entropy}(CO; T=T_{18M}; P=P_{CO}) \\ s_{O2_18M} &= \text{entropy}(O2; T=T_{18M}; P=P_{O2}) \\ s_{SO2_18M} &= \text{entropy}(SO2; T=T_{18M}; P=P_{SO2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Exergia_CO2_18M} &= ((h_{CO2_18M} - h_{CO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO2_18M} - s_{CO2_AMB})) * 44 \\ \text{Exergia_H2O_18M} &= ((h_{H2O_18M} - h_{H2O_AMB}) - T_{AMB} * (s_{H2O_18M} - s_{H2O_AMB})) * 18 \\ \text{Exergia_N2_18M} &= ((h_{N2_18M} - h_{N2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{N2_18M} - s_{N2_AMB})) * 28 \\ \text{Exergia_CO_18M} &= ((h_{CO_18M} - h_{CO_AMB}) - T_{AMB} * (s_{CO_18M} - s_{CO_AMB})) * 28 \\ \text{Exergia_O2_18M} &= ((h_{O2_18M} - h_{O2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{O2_18M} - s_{O2_AMB})) * 32 \\ \text{Exergia_SO2_18M} &= ((h_{SO2_18M} - h_{SO2_AMB}) - T_{AMB} * (s_{SO2_18M} - s_{SO2_AMB})) * 64 \end{aligned}$$

$$\text{Exergia_fisica_18M} = FM_{CO2p} * \text{Exergia_CO2_18M} + FM_{H2Op} * \text{Exergia_H2O_18M} + FM_{N2p} * \text{Exergia_N2_18M} + FM_{COp} * \text{Exergia_CO_18M} + FM_{O2p} * \text{Exergia_O2_18M} + FM_{SO2p} * \text{Exergia_SO2_18M}$$

$$\text{Exergia_total_18} = \text{moles_comb} * (\text{Exergia_quimica_total} + \text{Exergia_fisica_18M})$$

$$\begin{aligned} \text{Exergia_destruida_Evaporador} &= \text{Exergia_total_12} - \text{Exergia_total_13} \\ \text{Exergia_destruida_sc2} &= \text{Exergia_total_13} - \text{Exergia_total_14} \\ \text{Exergia_destruida_sc1} &= \text{Exergia_total_14} - \text{Exergia_total_15} \\ \text{Exergia_destruida_ca_sec} &= \text{Exergia_total_15} - \text{Exergia_total_16} \\ \text{Exergia_destruida_ca_prim} &= \text{Exergia_total_16} - \text{Exergia_total_17} \end{aligned}$$

Exergia_destruida_economizador=Exergia_total_17-Exergia_total_18