



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE  
CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA  
TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA**

**Ricardo Andrés Sarceño Corado**

Asesorado por el Ing. Edwin Sarceño Zepeda

Guatemala, noviembre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE  
CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA  
TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**RICARDO ANDRÉS SARCEÑO CORADO**

ASESORADO POR EL ING. EDWIN SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 15 de octubre de 2019.

**Ricardo Andrés Sarceño Corado**





Guatemala, 23 de septiembre de 2020  
REF.EPS.DOC.324.09.2020.

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Ricardo Andrés Sarceño Corado** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 201213264, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

  
Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda  
Asesor-Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo  
EDSZ/ra



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 23 de septiembre de 2020  
REF.EPS.D.146.09.2020

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Morales Baiza:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Ricardo Andrés Sarceño Corado** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS

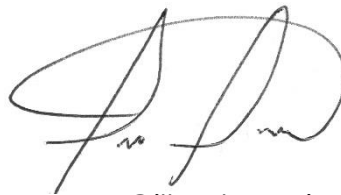


OAH/ra



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA** del estudiante **Ricardo Andrés Sarceño Corado**, DPI **2701714442214**, Reg. Académico **201213264**, y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

***“Id y Enseñad a Todos”***



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre de 2020

/aej



DTG. 410.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE MEJORA DE COMBUSTIÓN CON LA RECUPERACIÓN DE CENIZA PARA EL APROVECHAMIENTO DE INQUEMADOS PLANTA TERMOELÉCTRICA DE INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA**, presentado por el estudiante universitario: **Ricardo Andrés Sarceño Corado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser una importante influencia en mi vida y no apartarme del buen camino, dándome la fuerza para seguir siempre adelante.
- Mis padres** Armando Sarceño y Mayra Corado, por estar siempre para mí y brindarme su apoyo incondicional y sabios consejos durante mi carrera. Su orgullo y amor serán siempre mi inspiración, gracias.
- Mi hermana** Diana Sarceño, por su cariño, apoyo y comprensión.
- Mi abuela** Adela Arana, por su apoyo incondicional y estar siempre pendiente durante el desarrollo de mi carrera, velando por mi bienestar y el de la familia.
- Mis tíos** Fredy Corado, Sarah Osling, Ingrid Corado, Sandra Corado y Vicente Cantoral. Por ser una importante influencia en mi carrera, y apoyo durante el desarrollo de esta.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios que me brindó los recursos para superarme.

**Facultad de Ingeniería**

Por recibirme en sus salones y brindarme las herramientas necesarias para ser un profesional de éxito.

**Mis amigos de la  
Facultad**

Por su amistad, el apoyo brindado y las experiencias a través de los años y cursos juntos.

**Ingenio Santa Ana**

Por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de realizar mi EPS en la empresa; esto me permitió conocer nuevas personas y formar nuevas amistades.

**Ingenieros de  
cogeneración**

Por ser parte de mi formación profesional dentro del ingenio. Gracias por sus consejos y compartir sus experiencias.

**Ing. Edwin Sarceño**

Por el apoyo y correcciones durante la realización de mi proyecto.

**Mis primos**

Por el apoyo incondicional y consejos brindados desde el inicio de mi carrera.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de la empresa .....	1
1.1.1. Ubicación .....	2
1.1.2. Historia .....	2
1.1.3. Misión .....	3
1.1.4. Visión.....	3
1.1.5. Valores .....	3
1.1.6. Organigrama.....	4
1.2. Generalidades de una planta termoeléctrica .....	4
1.2.1. Características.....	5
1.2.2. Operación .....	5
1.2.3. Sistema eléctrico nacional .....	7
1.3. Tipos de calderas .....	8
1.3.1. Acuotubulares.....	9
1.3.2. Piro tubulares.....	13
1.4. Equipos auxiliares de la caldera de vapor .....	16
1.4.1. Equipo de control y seguridad .....	16
1.4.1.1. Trasmisores de temperatura.....	16

1.4.1.2.	Transmisores de presión .....	17
1.4.1.3.	Medidores de nivel .....	18
1.4.1.4.	Medidores de flujo .....	18
1.4.1.5.	Válvulas de seguridad .....	19
1.4.1.6.	Válvulas de purga.....	20
1.4.2.	Parrillas .....	21
1.4.3.	Hogar.....	21
1.4.4.	Paredes de agua .....	23
1.4.5.	Sobrecalentadores .....	24
1.4.5.1.	Atemperación .....	25
1.4.6.	Equipos de aprovechamiento del calor .....	26
1.4.6.1.	Evaporador.....	26
1.4.6.2.	Economizador .....	26
1.4.6.3.	Pre calentador de aire .....	27
1.4.7.	Trampas de vapor .....	27
1.4.8.	Chimenea .....	27
1.5.	Sistema de combustible .....	28
1.5.1.	Alimentación de bagazo .....	28
1.5.1.1.	Conductores de bagazo .....	28
1.5.2.	Alimentadores de carbón.....	29
1.5.2.1.	Transporte y almacenaje de carbón .....	29
1.5.2.2.	Conductores de carbón .....	30
1.5.2.3.	Trituradora de carbón .....	31
1.6.	Inquemados .....	31
1.6.1.	Tipos de quemados .....	31
1.6.1.1.	Ceniza volante.....	32
1.6.1.2.	Ceniza de fondo .....	33
1.7.	Sistema de condensados .....	34
1.7.1.	Desaireador.....	34

1.7.2.	Bombas de condensados .....	34
1.7.3.	Calentadores de agua de alimentación .....	34
1.7.4.	Bombas de agua de alimentación.....	35
1.7.5.	Tanque de almacenamiento .....	36
1.8.	Sistema de enfriamiento de agua .....	36
1.8.1.	Torre de enfriamiento .....	36
1.8.2.	Planta de tratamiento de agua.....	37
1.9.	Turbogenerador eléctrico.....	37
1.9.1.	Turbina .....	38
1.9.1.1.	Principales partes de la turbina.....	39
1.9.1.1.1.	Tobera .....	39
1.9.1.1.2.	Rotor.....	39
1.9.1.1.3.	Carcaza .....	40
1.9.1.1.4.	Sellos de aceite .....	40
1.9.1.1.5.	Sellos de vapor.....	40
1.9.1.1.6.	Chumaceras .....	40
1.9.2.	Generador eléctrico .....	41
1.9.2.1.	Principales partes de un generador eléctrico .....	41
1.9.2.1.1.	Excitatriz.....	41
1.9.2.1.2.	Sistema de enfriamiento.....	42
1.10.	Sistema de distribución de energía eléctrica .....	43
1.10.1.	Transformador .....	43
1.10.2.	Líneas de transmisión.....	43
2.	FASE DE INVESTIGACIÓN. AHORRO DE AGUA .....	45
2.1.	Diagnóstico situacional.....	45
2.2.	Proceso de tratamiento de agua y purgas.....	46

2.3.	Manejo de ceniza .....	46
2.3.1.	Tolvas de recepción de ceniza .....	46
2.3.2.	Silo de ceniza .....	47
2.4.	Acondicionamiento de ceniza.....	48
2.5.	Ahorro de agua .....	50
2.5.1.	Áreas donde se utiliza agua .....	58
2.5.2.	Consumo de agua en limpieza y riego .....	59
2.6.	Instalación de bomba para reutilización de agua .....	59
2.7.	Instalación de tubería para conducción de agua.....	61
2.8.	Instalación de sistema para acondicionador de ceniza .....	62
3.	FASE TÉCNICO PROFESIONAL. REINYECCIÓN DE INQUEMADOS .....	65
3.1.	Descripción del sistema en el área de calderas de la planta....	65
3.2.	Tratamiento del combustible .....	65
3.2.1.	Recepción y almacenamiento del carbón.....	66
3.2.1.1.	Trituración .....	66
3.2.2.	Recepción del bagazo de caña .....	67
3.3.	Resultados de laboratorio .....	67
3.3.1.	Poder calorífico de la ceniza .....	74
3.4.	Diagnóstico de la situación.....	74
3.4.1.	Temporada de zafra .....	75
3.4.1.1.	Determinación de producción de ceniza en temporada de zafra .....	75
3.4.1.2.	Determinación de porcentaje LOI ( <i>lost of ignition</i> ).....	80
3.4.1.3.	Determinación de la cantidad de ceniza con alto contenido de carbón mineral para reinyección .....	81



3.4.1.4.	Determinación de la cantidad de carbón que no se está aprovechando..	81
3.4.2.	Temporada de no zafra .....	82
3.4.2.1.	Determinación de producción de ceniza en temporada de no zafra .....	82
3.4.2.2.	Determinación de porcentaje LOI ( <i>lost of ignition</i> ) temporada de no zafra .....	85
3.4.2.3.	Determinación de la cantidad de ceniza con alto contenido de carbón mineral para reinyección en temporada de no zafra.....	86
3.4.2.4.	Determinación de la cantidad de carbón que no se está aprovechando en temporada de no zafra.....	86
3.5.	Efecto económico de la pérdida de carbón mineral sin quemar .....	87
3.6.	Ahorro de carbón con base en poder calorífico con la reinyección de ceniza .....	88
3.7.	Operación del aire primario, secundario y forzado en las calderas .....	89
3.8.	Incremento de ganancias por reducción de inquemados y recuperación de gastos de inversión .....	90
4.	FASE DE DOCENCIA .....	93
4.1.	Capacitación al personal de operación y mantenimiento .....	93
4.2.	Presentación de mejoras y avances.....	94
	CONCLUSIONES .....	95
	RECOMENDACIONES .....	97

BIBLIOGRAFÍA..... 99  
ANEXO..... 101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Organigrama de la empresa.....	4
2.	Diagrama de una central térmica .....	12
3.	Partes de una caldera pirotubular .....	15
4.	Vista en corte, válvula de seguridad.....	20
5.	Sobrecalentador de caldera .....	24
6.	Atemperador de vapor.....	25
7.	Ceniza de fondo y su desalojo de la caldera.....	33
8.	Agua descargada a zanjas.....	45
9.	Silo de ceniza.....	47
10.	Descarga de ceniza a góndolas .....	49
11.	Compuerta instalada en canal.....	50
12.	Curva de diseño, según fabricante.....	57
13.	Aplicación de <i>grouting</i> para bancazo .....	60
14.	Bancazo de motor-bomba .....	60
15.	Instalación motor-bomba.....	61
16.	Instalación de tubería para descarga. ....	61
17.	Línea de succión y descarga de bomba.....	62
18.	Motor-bomba acondicionador de ceniza .....	63
19.	Trituración del carbón.....	66
20.	Recirculación de inquemados del evaporador .....	91
21.	Capacitación a operadores de calderas.....	93
22.	Análisis próximo del carbón .....	101

## TABLAS

I.	Pérdidas por accesorios, succión .....	52
II.	Pérdidas por accesorios, descarga .....	52
III.	Datos técnicos del motor .....	56
IV.	Datos técnicos de la bomba.....	57
V.	Resultados en operación con bagazo.....	67
VI.	Resultados de evaporador.....	68
VII.	Resultados de economizador (PDC).....	69
VIII.	Resultados de precalentador de aire .....	69
IX.	Resultados de precipitador electrostático .....	70
X.	Resultados de silo de ceniza .....	70
XI.	Resultados de evaporador mezcla 70/30.....	71
XII.	Resultados de economizador mezcla 70/30 .....	71
XIII.	Resultados de precalentador de aire mezcla 70/30.....	72
XIV.	Resultados de precipitador electrostático mezcla 70/30 .....	72
XV.	Resultados de silo de ceniza mezcla 70/30 .....	73
XVI.	Resumen de resultados .....	73
XVII.	Poder calorífico de la ceniza.....	74
XVIII.	Cantidad de ceniza producida .....	76
XIX.	Valores de <i>trash</i> mineral .....	77
XX.	Datos de análisis de carbón según fabricante .....	78
XXI.	Datos de análisis de combustibles.....	78
XXII.	Producción de ceniza.....	79
XXIII.	Resultados LOI para evaporador.....	80
XXIV.	Cantidad de ceniza producida con carbón.....	83
XXV.	Datos de análisis próximo del carbón .....	84
XXVI.	Producción de ceniza con carbón.....	84
XXVII.	Valores LOI para ceniza de carbón.....	85

XXVIII.	Flujo de efectivo .....	92
---------	-------------------------	----



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Hp</b>	Caballos de fuerza
<b>K</b>	Coeficiente de pérdidas menores
<b>f</b>	Coeficiente de fricción
<b>D</b>	Diámetro de tubería
<b>\$</b>	Dólar
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>h</b>	Hora
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por centímetro cuadrado
<b>Kw</b>	Kilowatts
<b>Lb</b>	Libra
<b>Psi</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>Mw</b>	Megawatts
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno
<b>s</b>	Segundo
<b>BTU</b>	Unidad de medida de la energía de un combustible en el sistema inglés





## GLOSARIO

<b>Atemperador</b>	Equipo utilizado en la regulación de la temperatura del vapor sobrecalentado.
<b>Bagacera</b>	Punto de almacenaje del bagazo, producto de la extracción de jugo a la caña de azúcar.
<b><i>Bottom ash</i></b>	Ceniza de fondo, resultante de la quema del combustible en el hogar de la caldera; esta se queda en la parrilla de la misma.
<b><i>Fly ash</i></b>	Ceniza volante, producida por la combustión en la caldera; es contenida en los gases de escape de la misma.
<b>Hollín</b>	Partículas sólidas de tamaño pequeño, compuestas de carbono pulverizado por combustión incompleta.
<b>Inquemados</b>	Pérdidas que representan energía calorífica no liberada como consecuencia de una mala combustión.



## RESUMEN

Este trabajo fue realizado a través del programa de Ejercicio Profesional Supervisado, EPS, en el bloque dos de cogeneración del Ingenio Santa Ana, Escuintla, con el objetivo de poner en práctica los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecánica. El trabajo explica las razones por las cuales se debe mejorar el proceso de combustión en la caldera con mayor utilidad del Ingenio Santa Ana, debido a que es la que mayores capacidades de generación instalada posee.

Con el tiempo de operación y deterioro de los materiales instalados en la caldera, la empresa fue perdiendo eficiencia; esto provocó que se dieran costos elevados por el consumo de combustible a través de los alimentadores de la caldera. La falta de seguimiento y descuido en la operación de la planta provocó que se diera un alto porcentaje de inquemados. El proyecto consiste en determinar la cantidad de inquemados presentes en los diferentes pasos de gases {de la caldera, con el fin de reducirlos.

Se plantea la solución de la instalación de un sistema en el evaporador de la caldera con el objetivo de reinyectarle los inquemados y capacitar al personal sobre el uso eficiente de los diferentes tipos de aire, tales como: aire forzado, secundario, sobre fuego e inducido.



## OBJETIVOS

### General

Reducir el consumo de combustible y la presencia de inquemados, incrementando la eficiencia del sistema de generación de vapor en la planta.

### Específicos

1. Plantear una propuesta que sea económicamente viable para la reinyección de inquemados a la caldera, reduciendo el consumo de combustible e incrementando la eficiencia del sistema de generación de vapor en la planta.
2. Instalar un sistema de dosificación de agua proveniente de la torre de enfriamiento, utilizable en el sistema de ceniza para limpieza y riego de áreas, reduciendo el consumo de agua de pozo.
3. Capacitar al personal encargado de operación sobre un buen control de su combustión, para reducir inquemados en la ceniza *fly ash* y *bottom ash* resultante del proceso.



## INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica en el país crece cada día; esto se debe a la alta densidad de la población guatemalteca y a un sector industrial diversificado. A su vez esto genera una necesidad de suplir las demandas eléctricas de la población y por ende la utilización de diferentes plantas térmicas que estén en condiciones de aportar al sistema energético guatemalteco.

En el ingenio Santa Ana se cuenta con dos bloques de generación, los cuales están a cargo del área de cogeneración; el bloque 1 cuenta con cuatro calderas que se encargan de entregar vapor a cuatro turbogeneradores; el bloque 2 dispone una caldera y un turbogenerador.

El objetivo primordial de una caldera es la producción de vapor por medio de la aplicación de calor a un cuerpo de agua circulando en tuberías en las paredes de la caldera, resultante de la combustión de cualquier medio combustible.

Al existir un aumento en el consumo de potencia de la red eléctrica guatemalteca, la utilización de plantas energéticas de distintos tipos se ve incrementada, por lo cual, la competencia que se genera en los mercados energéticos es tal, que se deben operar los equipos de una manera en la cual se pueda incrementar la eficiencia de los procesos de la planta, reduciendo costos de operación. Uno de ellos es el aprovechamiento del combustible, ya que esto aporta en gran manera reducciones en los costos de producción para la planta que opera con biomasa y carbón mineral.





# **1. GENERALIDADES**

## **1.1. Descripción de la empresa**

Compañía Agrícola Industrial Santa Ana se dedica principalmente a la producción de azúcar, la cual comercializa como azúcar cruda estándar o refinada y melaza. También se tiene la generación de vapor para la producción y venta de energía eléctrica. En el área de fábrica y molinos se recibe la caña de azúcar para procesarla y extraer la mayor cantidad de jugo para convertirlo en azúcar y sus derivados.

El área cogeneración se encarga de producir vapor de extracción para la fábrica y para la generación de electricidad; esta será consumida por equipos auxiliares o podrá venderse a la red nacional. Se cuenta con cinco turbinas para hacer rotar generadores eléctricos y generar la potencia eléctrica necesaria para entregar energía a la red eléctrica de Guatemala, dependiendo del ente regulador y de las cinco turbinas que se tienen, una de ellas tiene la capacidad de generar a baja presión llamada turbo generador de 4; este utiliza el vapor de escape que va hacia la fábrica una vez la presión se haya reducido de 1,72 a 0,34 MPa; tiene una capacidad de 4 MW y está ubicado en el área de fábrica. El resto de las turbinas están colocadas en el área de cogeneración.

Entre las turbinas ubicadas en el área de cogeneración se tiene el turbo generador de 25 000 KW, el cual funciona con vapor de entrada a 5,86 MPa, produciendo vapor de escape que se condensa y se reutiliza en el ciclo.

### **1.1.1. Ubicación**

La planta de producción del ingenio Santa Ana está ubicada en el departamento de Escuintla, a 220 metros sobre el nivel del mar, en el kilómetro 64,5 carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa, finca interior Cerritos.

### **1.1.2. Historia**

Ingenio Santa Ana inició operaciones con una zafra de prueba en 1969; en 1983 se instaló una refinería para elaborar azúcar refinada de alta calidad, año donde se consigue un acuerdo con la Empresa Eléctrica de Guatemala, EEGSA, para iniciar la cogeneración de energía eléctrica a la red nacional, aportando una potencia de 800 KW. En la actualidad tiene una capacidad instalada de generación de 8,4 MW.

Además de la generación eléctrica, producción de caña de azúcar y elaboración de azúcar, que son reconocidos a nivel mundial por sus altos estándares de calidad, ingenio Santa Ana también comercializa subproductos como melaza, bagazo y cachaza, y diversos servicios conexos.

Actualmente cuenta con una capacidad aproximada de molienda de 20 000 toneladas de caña al día, que equivalen a unos 45 000 quintales de azúcar diarios. En un año aproximadamente se producen alrededor de 7 millones de quintales de azúcar equivalentes a 700 millones de libras de azúcar.

Es una corporación con sobresaliente desempeño. En sus 50 años se ha convertido en uno de los líderes de la agroindustria azucarera; inició como un pequeño ingenio con capacidad de molienda de 3 000 toneladas métricas de caña de azúcar por día.

### **1.1.3. Misión**

“Somos una empresa guatemalteca que produce y comercializa azúcar, melaza y energía eléctrica a través de un marco de confianza y ética, aplicando métodos innovadores, enfocados en crear valor económico y social”<sup>1</sup>.

### **1.1.4. Visión**

“Ser una organización líder en la agroindustria azucarera guatemalteca, comprometida con nuestros clientes, la sociedad y el medio ambiente; manteniendo la sustentabilidad del negocio, a través de la eficiencia operacional y financiera, generando bienestar para nuestros accionistas, colaboradores, clientes, proveedores y al país en general”<sup>1</sup>.

### **1.1.5. Valores**

- Responsabilidad
- Transparencia
- Flexibilidad
- Honestidad
- Disciplina
- Respeto
- Lealtad

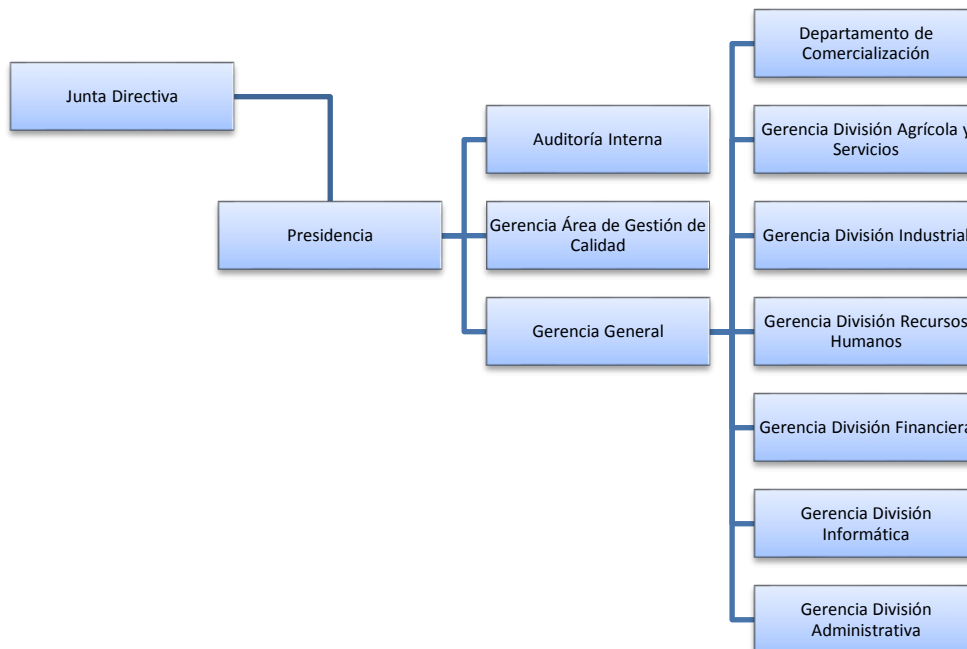
---

<sup>1</sup> Ingenio Santa Ana. *Manual de Ética Laboral*. p.3.

### 1.1.6. Organigrama

Es la representación gráfica de la estructura de una empresa o una institución, en la cual se muestran las relaciones entre sus diferentes partes y la función de cada una de ellas, así como de las personas que trabajan en las mismas.

Figura 1. Organigrama de la empresa



Fuente: elaboración propia, empleando SmartArt.

### 1.2. Generalidades de una planta termoeléctrica

Una central térmica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, diésel, búnker o bagazo en una caldera.

### **1.2.1. Características**

. El funcionamiento de todas las centrales termoeléctricas es semejante. El combustible se almacena en patios o bagaceras, desde donde se suministra por medio de conductores al hogar de la caldera, para producir la combustión.

La caldera genera el vapor a partir del agua que circula por una extensa red de tubos que tapizan sus paredes. El vapor generado es enviado para hacer girar los álabes de la turbina, cuyo eje rotor gira solidariamente con el de un generador que produce la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión. El vapor es enfriado en un condensador y convertido otra vez en agua, que vuelve a los tubos de la caldera, comenzando un nuevo ciclo. El agua en circulación que refrigera el condensador expulsa el calor extraído a la atmósfera a través de las torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento son enormes cilindros contraídos a media altura, que emiten de forma constante vapor de agua no contaminante a la atmósfera. Para minimizar los efectos contaminantes de la combustión sobre el entorno, toda central dispone de una chimenea de gran altura (llegan a los 300 m) y de un precipitador electrostático que retiene las cenizas y otros volátiles de la combustión. Las cenizas son transportadas por medio de un sistema de aire comprimido hacia un silo, donde posteriormente será descargado en un punto de almacenaje para ser utilizado en algún otro proceso.

### **1.2.2. Operación**

La operación de una caldera inicia desde la recepción del carbón o bagazo que se almacena en patios o bodegas, desde donde se llenan periódicamente los silos, alimentadores de carbón y chifles en el caso del bagazo, con el objetivo

de mantener un suministro constante de combustible a la caldera, conservando parámetros constantes de presión y temperatura, según demandas de vapor para extracciones o generación.

La combustión de los diferentes productos usados en las calderas se da gracias a un conjunto de procesos fisicoquímicos en los que un elemento combustible en este caso carbón bituminoso triturado o bagazo de caña se combina con un elemento carburante, generalmente oxígeno.

En toda combustión son necesarios de tres factores importantes: combustible, oxígeno y una fuente de ignición; si no se cumple con alguno de esos factores no se genera llama, la cual, al liberar energía química, que se produce por la combustión de combustible fósil en el hogar de la caldera, es transformada en energía eléctrica. Todas las centrales térmicas convencionales funcionan bajo los mismos principios, no importando el tipo de combustible que utilicen.

Las únicas diferencias en operación que hacen distinta una de la otra es el tratamiento del combustible antes de ser inyectado al hogar de la caldera (este puede ser triturado o pulverizado), y el tipo de quemadores que tenga, que va a variar en función del combustible suministrado.

El vapor resultante de la circulación de agua en las paredes del hogar a temperaturas cercanas a los 720 °C produce un vapor sobrecalentado que ronda los 540 °C; el cual se hace circular en los álabes de la turbina, creando así energía mecánica a velocidades de 3 600 revoluciones por minuto; esta energía resultante es transformada en energía eléctrica por un generador acoplado a la turbina.

### **1.2.3. Sistema eléctrico nacional**

La mayoría de las actividades de la sociedad actual se basa en el uso de la energía en sus diferentes expresiones, desde el uso de un vector energético como la electricidad para iluminación en nuestras casas, motores eléctricos en una fábrica o equipos electrónicos. En Guatemala, la oferta energética inicia con los sistemas de generación, de los cuales pueden mencionarse los que operan con búnker, diésel, carbón mineral, biomasa e hidroeléctricas, que son las fuentes primarias de transformación de energía eléctrica. Estos cinco actores principales en el sistema eléctrico nacional tienen un rol en el suministro de la energía, ya sea en la generación, transporte, distribución, comercialización o como un usuario.

Las hidroeléctricas tienen como característica su bajo impacto al medio ambiente; proveen electricidad a precios competitivos, por su relativo bajo costo de operación y estabilidad, ya que no dependen de precios internacionales.

En Guatemala, para todas las centrales generadoras existe el ente llamado Administrador del Mercado Mayorista (AMM), que se encarga de coordinar los despachos de energía entre los participantes del mercado mayorista y vela por la calidad y abastecimiento de energía. Está conformado por los generadores, transportistas, comercializadores, distribuidores y grandes usuarios.

Se tienen líneas de transmisión y subestaciones para la transformación de potencia. Las subestaciones son un medio para trasladar la energía eléctrica a las distribuidoras; estas se encargan del suministro eléctrico hasta el hogar de los usuarios; consumo que está sujeto a las tarifas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

El sector energético en Guatemala está integrado por dos subsectores: eléctrico e hidrocarburos, los cuales se rigen bajo las normas del Ministerio de Energía y Minas (MEM), aplicando y velando por el cumplimiento de la Ley General de Electricidad.

Esta ley determina cómo está conformado el mercado eléctrico regulado, incluyendo a los distribuidores y usuarios del servicio eléctrico que no cumplen con el mínimo de demanda de potencia que establece el Ministerio de Energía y Minas, y el mercado mayorista. La ley también señala el marco institucional del subsector eléctrico, que está conformado por tres entes: rector, regulador y operador del sistema y del mercado eléctrico. Por lo que se concluye que las generadoras de energía eléctrica son ajenas a las tarifas que se aplican a los usuarios e industrias.

La energía eléctrica producida en Guatemala es trasladada a las líneas de transporte, para finalmente ser utilizada por el usuario final en industrias, comercios y hogares.

### **1.3. Tipos de calderas**

El principio fundamental de operación de una caldera es el aprovechamiento de calor generado por la combustión para su transferencia al fluido que en su interior circula; consta de superficies diseñadas para la circulación y separación de agua y vapor.

Las calderas son clasificadas en: calderas de tubos de agua (acuotubulares) y calderas de tubos de humos (pirotubulares).



### **1.3.1. Acuotubulares**

Son calderas en las cuales el fluido de trabajo se va desplazando en el interior de la tubería por gases de combustión que circulan en el exterior de los mismos, provocando así su calentamiento. Son usadas cuando se necesita de presiones de trabajo grandes, por encima de los 2,2 MPa.

Estas calderas se componen de tubos y domos; los tubos sirven para interconectar los domos que están localizados en la parte exterior en relación con estos.

Los domos tienen la función de almacenar agua en la mitad inferior y vapor en la parte superior; no necesitan de superficie tubular de calefacción; pueden fabricarse con diámetros menores a los de una caldera piro-tubular, por lo que son construidos para soportar presiones más altas, dejando las superficies de calefacción únicamente a los tubos.

En estas calderas la calidad del agua de alimentación es muy importante, la cual debe ser superior a la requerida por otro tipo de calderas; por la separación del vapor existen calderas que utilizan domos de lodos (superior e inferior) donde se depositarán los depósitos formados por la evaporación del agua; estos son retirados mediante purgas. El domo superior está equipado con deflectores para desviar al sistema de recirculación del agua fría que entra, y con separadores centrífugos para aislar el agua del vapor.

Para la producción continua de vapor en el sistema, es necesaria una circulación constante de agua en los cabezales y elementos de interconexión, para que el vapor formado en las paredes de los tubos sea reemplazado con nuevas cantidades de agua que seguirán el ciclo.

El agua se hace circular por medio de bombas de alimentación, hasta alcanzar velocidades considerables; con lo que se consigue una transmisión de calor de manera eficiente, elevando la capacidad de producción de vapor.

La circulación del agua puede ser natural o forzada; en todos los casos la cifra que caracteriza la circulación es un coeficiente de circulación “n” definido para cada tubo como la relación entre el flujo de agua que circula en la caldera  $W_a$  y el flujo de vapor producido  $W_v$ .

$$n = \frac{W_a}{W_b}$$

Donde:

$W_a$  = flujo de agua circulando en la caldera

$W_b$  = flujo de vapor producido

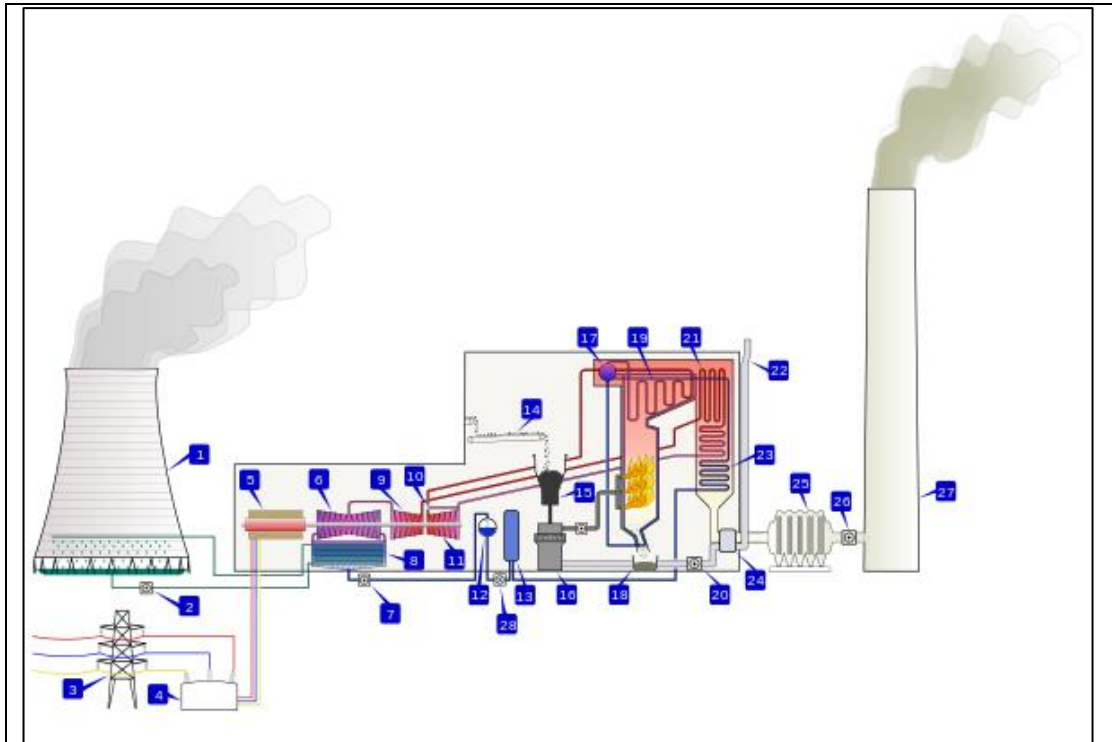
Las calderas acuotubulares pueden dividirse en dos principales tipos:

- De hogar integral, pequeñas: se caracterizan por una producción de vapor relativamente baja, hasta de 30 toneladas; y temperaturas de hasta 400 °C. Son ideales cuando se requiere de una instalación rápida y no se dispone de mucho espacio.
- De hogar integral, grandes: son calderas de mayor producción de vapor de 200 toneladas por hora o más. Utilizan temperaturas para sobrecalentar el vapor, de hasta 550 °C. Encuentran mejor aplicación en la producción de vapor requerida para la cogeneración de energía eléctrica o en

procesos con temperatura controlada. Por el tipo de tubos pueden clasificarse en:

- Caldera horizontal de tubos rectos
  - De tipo paquete, con hogar de caja
  - De domo longitudinal
  - De cabezal de caja
- 
- De tubos curvados
    - De dos domos en forma de “O”
    - De tubos cortos y tubos largos
    - De tres domos en forma de “A”
    - De dos domos, de tubos oblicuos
    - De cabezal bajo y tres domos
    - De tres domos
    - De cuatro domos

Figura 2. Diagrama de una central térmica



1. Torre de refrigeración	15. Tolva de carbón
2. Bomba hidráulica	16. Pulverizador de carbón
3. Línea de transmisión	17. Tambor de vapor
4. Transformador	18. Tolva de cenizas
5. Generador eléctrico	19. Sobrecalentador
6. Turbina de vapor de baja presión	20. Ventilador de tiro forzado
7. Bomba de condensación	21. Evaporador
8. Condensador de superficie	22. Toma de aire de combustión
9. Turbina de media presión	23. Economizador
10. Válvula de control de gases	24. Precalentador de aire
11. Turbina de vapor de alta presión	25. Precipitador electrostático
12. Desgasificador	26. Ventilador de tiro inducido
13. Calentador	27. Chimenea de emisiones
14. Cinta transportadora de carbón	28. Bomba de alimentación

Fuente: Tecnoparador. *Central termoeléctrica.*

[http://tecnoparador.es/actividades/centrales/centrales\\_termoelctricas.html](http://tecnoparador.es/actividades/centrales/centrales_termoelctricas.html). Consulta: febrero de 2020.

### 1.3.2. Pirotubulares

Como su nombre lo indica son calderas en las cuales circula agua en el exterior de la tubería y los gases de combustión en la parte interna de los mismos, generando así una transferencia por convección; suelen ser de menor tamaño. Generalmente tienen un hogar integral llamado también caja de fuego, limitado por las superficies enfriadas por agua. Estas calderas, según función de la disposición de la tubería se clasifican en:

- Calderas horizontales: la tubería se encuentra distribuida en forma horizontal de la parte delantera a la trasera de la caldera; estas son una combinación de parrilla, altar refractario, puertas de carga, cámara de combustión y cenicero. Las superficies internas de la caldera están cubiertas por refractario, y los gases que circula tienen contacto con el fondo de la caldera pasando por encima del altar, volviendo a la parte frontal de la caldera, cruzando hacia el interior de los tubos, para finalmente salir por la chimenea.
- Calderas verticales: en este tipo de calderas pirotubulares la tubería se encuentra distribuida en forma vertical de la parte inferior a la superior de la caldera. Las calderas pirotubulares también se pueden clasificar según su construcción en:
  - De hogar externo:
    - Tipo compacto
    - De caja corta
    - Horizontal tubular de retorno
  - De hogar interno:

- Horizontales tubulares
  - ✓ De hogar corto
  - ✓ Tipo compacto
  - ✓ Locomóviles
  - ✓ De tipo escocés
    - ❖ De cabezal posterior de agua
    - ❖ De cabezal posterior seco
    - ❖ De cubierta de agua
  - ✓ Calderas tipo escocés de paquete
    - ❖ De dos o más pasos
    - ❖ De cabezal posterior seco, de cabezal posterior de agua y de tapa de agua.
  
- Caldera vertical tubular
  - ✓ Caldera de fuerza
    - ❖ De domo recto
    - ❖ De caja de humo cónica

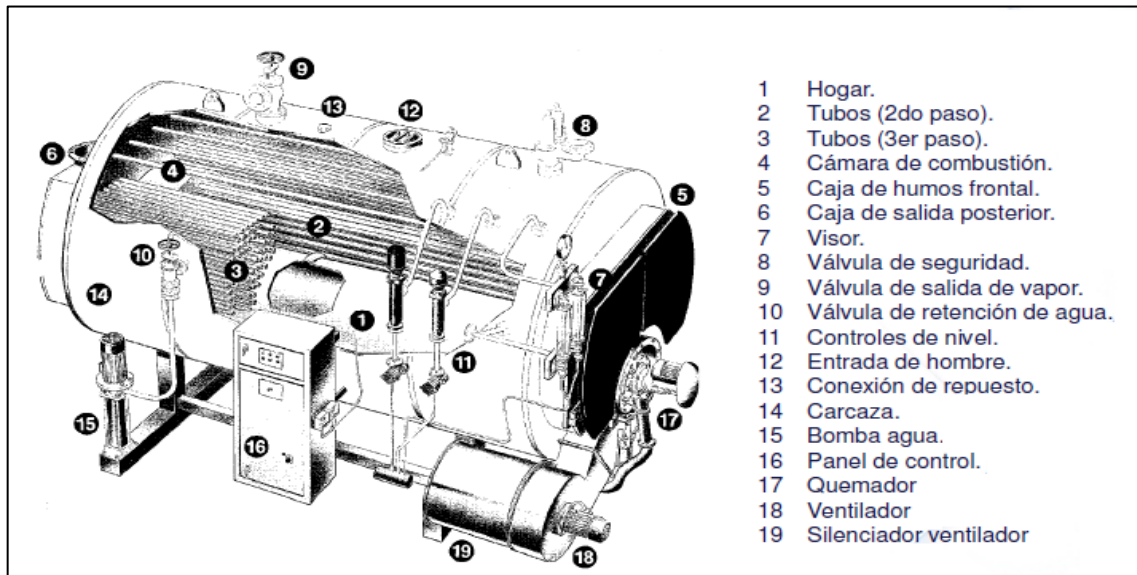
Las calderas originalmente eran recipientes cilíndricos, los cuales fueron mejorados con el paso del tiempo, mediante la circulación de los gases en el interior de los tubos colocados en la parte interna de la caldera.

Las calderas pirotubulares generalmente se usan en situaciones donde la demanda de vapor no es muy alta, por ejemplo: en hoteles, hospitales, para trabajos de esterilización y lavado de materiales de uso común como cubiertos, ropa y alimentos. No se utilizan para la generación de energía eléctrica donde se necesite turbinas, ya que no es conveniente adaptarlas para cumplir con las características de un vapor seco que una turbina necesita.

El agua de alimentación en estas calderas es proporcionada con base en su tamaño y diseño. Tienen un gran volumen de agua almacenada, además de la ventaja de corregir con facilidad cualquier fluctuación en las demandas de vapor; el tiempo de arranque necesario en frío es mucho menor que el de una caldera con tubos de agua o acuotubular, pero tienen una capacidad de recalentamiento limitada, dependiendo en sí de su diseño. Si se aumenta la demanda de vapor se obtiene un incremento rápido de la temperatura de los gases de combustión.

Las calderas son diseñadas con ciertos pasos, pueden ser de uno, dos, tres o cuatro pasos, que influyen en el tiempo que los gases de combustión están transmitiendo calor al fluido de trabajo dentro de ella. Las partes generales de una caldera pirotubular están representadas en la siguiente figura:

Figura 3. Partes de una caldera pirotubular



Fuente: Solo ejemplos. Tipos de calderas. <https://www.soloejemplos.com/ejemplo-de-tipos-de-calderas/>. Consulta: enero de 2020.

## **1.4. Equipos auxiliares de la caldera de vapor**

En su operación toda caldera necesita de los medios para monitorear su comportamiento, con el fin de hacer más eficiente el proceso; pueden llevarse históricos de variables importantes en su operación, cuidando así la vida útil de la misma y la seguridad de los colaboradores.

### **1.4.1. Equipo de control y seguridad**

Si se dota a la caldera de elementos de regulación, control y seguridad pueden evitarse accidentes como una sobrepresión peligrosa que pudiera afectar el proceso y la propia seguridad. Entre los elementos pueden mencionarse los que a continuación se describen.

#### **1.4.1.1. Trasmisores de temperatura**

Una de las variables más involucradas en los procesos es la temperatura, por su gran efecto en los sistemas físicos y termodinámicos.

Las bases para determinar la temperatura están basadas en las variaciones de: volumen, resistencia, fuerza electromotriz e intensidad de radiación emitida por un cuerpo; estos trasmisores se colocan a la entrada y salida de una tubería donde circule fluido de interés, en este caso en la tubería de agua de alimentación; en las de circulación de vapor o inclusive en ductos de aire, estos trasmisores ayudan a monitorear la operación, para que sea un proceso eficiente y con la menor cantidad de pérdidas posibles.



### **1.4.1.2. Transmisores de presión**

Este elemento ayuda a garantizar la seguridad en los equipos que contienen algún fluido a presión; en cualquier instante del proceso es necesario establecer cuál es el valor que adopta la presión, para así tomar alguna medida de seguridad, de ser requerida.

Presión es la fuerza unitaria impuesta sobre una unidad de área por un fluido, independientemente si es líquido o gaseoso; esta fuerza también actúa sobre las paredes de un recipiente. Cuando se tienen presiones por debajo de la presión absoluta (suma de la presión manométrica y la presión atmosférica) se define como condiciones de vacío y normalmente se miden en pulgadas o centímetros de mercurio. Para una caldera acotubular se tiene la presión de diseño, de servicio y la máxima de servicio, para las cuales existen lazos de control como medios de seguridad.

- Presión de diseño: se define como el valor utilizado para el cálculo de las partes que van a estar a presión en la caldera; es también llamada presión máxima de trabajo.
- Presión de servicio: es aquella que el operador de calderas utiliza normalmente; no sobrepasará el ajuste de las válvulas de seguridad.
- Presión máxima de servicio: corresponde a la magnitud límite a la que la caldera quedará sometida una vez que se conecte a la instalación receptora; cuando se alcance dicho valor las válvulas de seguridad comenzarán a evacuar.

#### **1.4.1.3. Medidores de nivel**

Para controlar el nivel visualmente en la caldera se dispone de los medidores de nivel; estos se encuentran en los tanques de agua de alimentación y de agua cruda, y en los domos, para garantizar el control, regulación y señalización electrónica, segura y fiable del nivel del agua. Un descuido del control de nivel es una de las situaciones que podrían producir la explosión de una caldera acuotubular. Las principales funciones de los medidores de nivel son:

- Controlar el nivel en el valor deseado.
- Minimizar la interacción con el control de combustión.
- Crear suaves cambios en el agua almacenada ante variaciones de carga.
- Equilibrar adecuadamente la salida de vapor con la entrada de agua.
- Compensar la variación de presión del agua de alimentación sin perturbar el proceso ni modificar la operación.

Es importante minimizar la interacción con el control de combustión. Esta se acentúa con el suministro desigual de agua de alimentación que afecta la presión de vapor y que conlleva modificaciones en la demanda de fuego, sin existir variaciones en la demanda de vapor.

#### **1.4.1.4. Medidores de flujo**

La medición de flujo en los procesos industriales se hace necesaria por dos principales razones: determinar las proporciones en masa o en volumen de los fluidos introducidos en un proceso, y la cantidad de fluido consumido o producido con el fin de computar costos. El flujo de fluidos en tuberías cerradas se define como la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal de la tubería por unidad de tiempo.

Esta cantidad de fluido se puede medir en masa o volumen; en función de esto se tiene un flujo volumétrico o másico. Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen de fluido, ya sea su desplazamiento en forma directa o indirecta; así podrán determinarse la presión diferencial, velocidad, área variable y tensión inducida.

Gracias a esto se puede monitorear de manera eficiente una caldera, reaccionando de buena manera ante cualquier eventualidad que se pudiera dar en la operación.

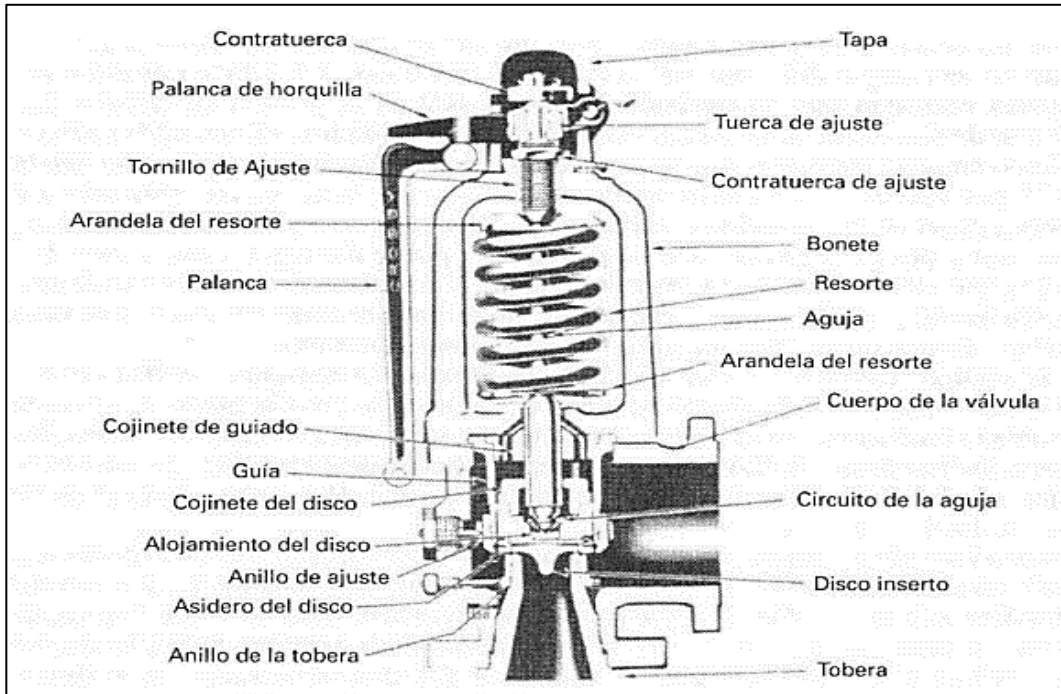
#### **1.4.1.5. Válvulas de seguridad**

Este es el dispositivo de seguridad más importante de una caldera, y puede ser la última defensa contra una explosión por sobrepresión. Estos son dispositivos de alivio de presión diseñados para evitar una subida interna de la misma, en un recipiente con presión excesiva sobre la admisible de trabajo.

El ajuste de presión debe corresponder a la presión máxima de diseño de la caldera y a la capacidad de la válvula de seguridad; esta debería ser, al menos, igual al vapor máximo que puede generarse en la caldera.

Estas válvulas en el circuito de vapor están ubicadas a la salida de la caldera y del vapor, sin válvulas intermedias de ningún tipo; son las encargadas de liberar presión en caso de existir una sobrepresión excesiva en la caldera y a una alta presión de escape.

Figura 4. Vista en corte, válvula de seguridad



Fuente: Emerson. *Válvulas y manómetros Crosby*. <https://www.emerson.com/es-es/automation/valves-actuators-regulators/crosby>. Consulta: mayo de 2020.

#### 1.4.1.6. Válvulas de purga

Este tipo de válvulas se utiliza para desalojar condensados de las líneas de vapor, eliminando y evacuando los lodos precipitados y restos de escamación; también para purgar agua en caso de un nivel alto del domo de alimentación, permitiendo una bajada rápida del nivel de agua si se ha elevado con exceso accidentalmente, como medida de eliminación de agua del sistema de calderas; de modo que pueda añadirse agua nueva para mantener la concentración de sólidos en la caldera por debajo del punto donde perjudique la operación de la caldera.

### **1.4.2. Parrillas**

Las parrillas de las calderas de biomasa pueden ser fijas, móviles o sistemas mixtos. En el caso de ser fijas, suelen estar dispuestas de forma inclinada con toberas distribuidas en la parrilla, con la finalidad de realizar limpiezas periódicas a la misma hacia el cenicero.

El principio de funcionamiento se basa en el avance del combustible mediante el arrastre de tablillas provistas de movimiento relativo entre sí. Estos elementos sostienen el combustible, insuflándose entre los mismos el aire necesario para la combustión. Según van avanzando los residuos se va completando la combustión de los mismos, de forma que a la salida el contenido de inquemados es bajo.

El material de combustión en su avance por la parrilla, pasa por tres etapas consecutivas, de proceso. En la primera de ellas se produce un secado, evaporando el agua contenida en el combustible. La combustión principal tiene lugar en la segunda fase. En la última fase se completa la combustión en aquellas fracciones de mayor temperatura de ignición.

### **1.4.3. Hogar**

El hogar en una caldera es una cámara donde se efectúa el proceso de combustión; en esta cámara se confina el producto de la combustión y puede resistir las altas temperaturas que se presentan y las presiones que se utilizan. El diseño de esta depende de la velocidad de liberación del calor, el tipo de combustible y el método de combustión, con el objetivo de que se dé una combustión completa y un medio para desalojar la ceniza.

Estos muchas veces difieren en tamaño y forma, en la disposición de la superficie absorbente del calor, localización de los quemadores y de la alimentación del combustible. La forma de la llama y su longitud afectan la geometría de la radiación, la velocidad y distribución de absorción del calor.

Las superficies absorbentes del calor en el hogar lo reciben de los productos de combustión, en consecuencia, contribuyen directamente a la generación del vapor, bajando la temperatura de los gases que salen del mismo. Los mecanismos de transferencia de calor se efectúan en forma simultánea. Estos mecanismos incluyen la radiación entre sólidos que provienen de las partículas de combustible, la radiación no luminosa de los productos de combustión, la transferencia de calor por convección de los gases del hogar y la conducción de calor a través de los materiales metálicos de los depósitos y tubos. La eficacia de la absorción de las superficies del hogar es influida por los depósitos de ceniza o escoria.

- Ventiladores: en las calderas se utiliza el tiro mecánico, que se define como la acción de inyectores de aire mediante ventiladores centrífugos, el cual es requerido cuando deba mantenerse determinadas condiciones en el interior del hogar de la caldera con independencia de las condiciones atmosféricas.
  - Inducido: el tiro inducido se consigue con un ventilador centrífugo colocado en la salida de los gases, entre la caldera y la chimenea. Este efecto consiste en reducir la presión de los gases en el hogar de la caldera, por debajo de la presión atmosférica y que así se descargue por la chimenea con una presión positiva.

- Forzado: se conoce como la acción de introducir aire en el interior del hogar de una caldera debajo de las parrillas y hogares mecánicos, la finalidad de los ventiladores de tiro forzado es dotar del aire necesario a la caldera para efectuar una correcta combustión. El aire del tiro forzado es previamente calentado utilizando los gases de combustión que salen hacia la atmósfera por la chimenea, esto con el objetivo de incrementar la temperatura del aire a la entrada de la caldera y así reducir la cantidad de combustible usado para elevar la temperatura dentro del hogar. Cuando se emplea una combinación de tiros inducidos y forzados, se dice que la caldera es de tiro equilibrado.
- Secundario: su función es la de realizar cierta turbulencia dentro del hogar de la caldera, con el objetivo de mejorar la combustión del bagazo. Cuando se produce turbulencia la combustión se realiza de mejor manera, ya que el bagazo es atomizado de tal manera, que la mayoría de la fibra se quema. Consta de un ventilador ubicado debajo del domo inferior de la parte central de la caldera; este succiona el aire del precalentador y lo envía por conductos aislados térmicamente hacia la parte media de la caldera.

#### **1.4.4. Paredes de agua**

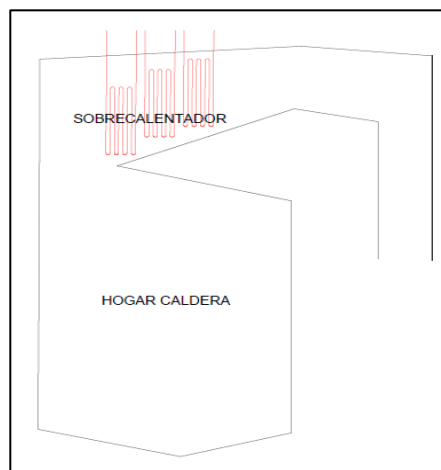
Son superficies evaporativas que cubren parcial o totalmente las paredes del hogar de una caldera. Reducen la transferencia de calor hacia los elementos estructurales. Las construcciones de tubos enfriados facilitan el logro de grandes dimensiones del hogar y óptimas de techos, tolvas y montajes de los quemadores, así como el uso de pantallas tubulares, planchas o paredes

divisoras, para aumentar la superficie absorbente del calor en la zona de combustión. El uso de estas paredes reduce las pérdidas de calor al exterior.

#### 1.4.5. Sobrecalentadores

Son intercambiadores de calor, dispuestos en el paso de los gases calientes. Generalmente se colocan en cualquier espacio libre y apropiado, cercano a los tubos de la caldera. Los sobrecalentadores reciben el vapor saturado o ligeramente húmedo que viene del domo de la caldera, y lo pasan sobrecalentando al colector general de vapor; de ese modo adiciona calor, eleva su temperatura y aumenta su volumen, con el objetivo de obtener un vapor seco que será utilizado para hacer rotar los alabes de la turbina.

Figura 5. Sobrecalentador de caldera



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Cuando en una turbina se utiliza vapor saturado, el trabajo realizado está limitado por la humedad que puede manipular la turbina sin un excesivo desgaste de sus alabes; este grado de humedad está entre el 10 % y el 15 %.



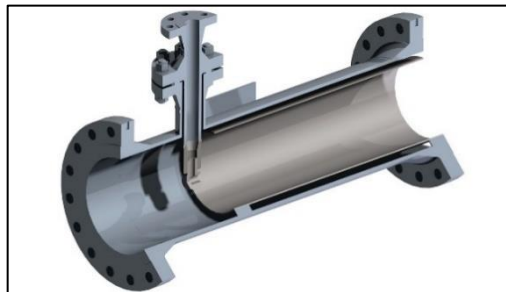
Al tener un sobrecalentador en la caldera se puede eliminar esta humedad del vapor, de tal manera que a su paso por la turbina no genere algún tipo de desgaste provocado por partículas de agua contenidas en un vapor saturado.

#### 1.4.5.1. Atemperación

Se aplica cuando se quiere regular y limitar la temperatura del vapor, diluyendo el vapor a alta temperatura en agua con baja temperatura. Los atemperadores se pueden clasificar en dos tipos:

- De mezcla: un atemperador de mezcla tiene parecido a un atomizador, en el cual se mezclan el vapor y el medio refrigerante, que puede ser agua y vapor saturado.
- De superficie: este tipo de atemperador comprende el tipo de recipiente y calderín; el vapor está separado del medio refrigerante por la superficie intercambiadora de calor.

Figura 6. Atemperador de vapor



Fuente: Global.es. *Spirax Sarco*. <https://www.spiraxsarco.com/global/es-CL/products/control-systems/desuperheater>. Consulta: febrero de 2020.

## **1.4.6. Equipos de aprovechamiento del calor**

Son los encargados de incrementar la eficiencia de la caldera con el aprovechamiento del calor liberado por la combustión en el hogar.

### **1.4.6.1. Evaporador**

Estos son haces de tubos dispuestos a contracorriente de los gases efectuando un intercambio por convección con el fluido que circula en los tubos. Están ubicados a la salida del hogar, después de transitar por los sobrecalentadores, los gases de combustión pasan por el evaporador, elevando la temperatura del agua, previo a ser utilizada en la caldera.

### **1.4.6.2. Economizador**

Este es un sistema de aprovechamiento del calor generado por la combustión en la caldera; una vez realizada la combustión, los gases se hacen pasar por un circuito de tuberías donde en el interior circula agua de alimentación para la caldera; este circuito es llamado economizador.

Su principal función es aprovechar la combustión de los gases de escape, y transmitirlos por medio de la convección al agua de alimentación que circula en la tubería, haciendo más fácil llevarla a una temperatura de ebullición, disminuyendo la energía necesaria para llegar al estado deseado de vapor sobrecalentado.

### **1.4.6.3. Precalentador de aire**

Luego de su paso por el economizador, los gases de escape se aprovechan para el calentamiento del aire de admisión; este paso donde los gases de escape calientan el aire de admisión es llamado precalentador de aire. Con este sistema se logra disminuir el combustible necesario para mantener constante la temperatura dentro del hogar de la caldera.

### **1.4.7. Trampas de vapor**

Se utilizan para desalojar condensado de las líneas de distribución o a la salida de un equipo consumidor. Estas forman una apertura cuando hay presencia de condensado y provocan cierre cuando hay presencia de vapor. Estas garantizan un buen funcionamiento de las tuberías y elementos de la red, contribuyendo al uso eficiente de la energía térmica. Se encuentran localizadas antes del ingreso de vapor a los equipos, y disponen de purgas manuales que se utilizan al poner en marcha algún equipo.

### **1.4.8. Chimenea**

El objetivo primordial de una chimenea es la conducción de gases resultantes de la combustión en el hogar de la caldera hasta el exterior. El aire necesario para esto es proporcionado por el tiro natural que se genera por la propia chimenea, que se origina por la diferencia de pesos específicos del aire exterior frío y los gases de la combustión; este es mayor cuanto más altura tiene la chimenea; depende también de la resistencia que ofrecen los conductos de humo de la caldera y de las características estructurales de la propia chimenea. El tiro es tanto mayor cuanto más elevada es la diferencia de temperaturas del aire exterior y de los gases.

## **1.5. Sistema de combustible**

El sistema de combustible puede dividirse en varios subsistemas; en este caso se analizará lo siguiente:

### **1.5.1. Alimentación de bagazo**

Este tipo de alimentación se utiliza únicamente en periodo de zafra, está conformado por un circuito de conductores de tablillas y bandas de hule, con las cuales se transporta el bagazo, resultado del paso de la caña por los molinos hacia calderas.

Los alimentadores de bagazo en la caldera tienen como función dotar a la caldera del combustible necesario para mantener los valores requeridos de presión y temperatura, necesarios para la producción de energía eléctrica y azúcar. El bagazo es descargado por los conductores hacia chifles de alimentación en la parte superior de la calera, que por gravedad y con ayuda de tambores rotativos con paletas, es lanzad al hogar de la caldera para su combustión.

#### **1.5.1.1. Conductores de bagazo**

Sistema con el cual se transporta el bagazo hacia las calderas o a los depósitos establecidos llamados bagaceras. Estos pueden ser de dos tipos:

- Conductores de banda de hule: se componen de largos tramos de bandas de hule, destinados únicamente para el transporte y alimentación de bagazo a las calderas; este circuito inicia desde la salida de los dos tándems de molinos que se tienen en operación, y hace su recorrido hacia

todas las calderas. Por medio de arados es transportado según demanda, o descargado en los espacios destinados al almacenaje del bagazo.

- Conductores de tablillas: están ubicados directamente en las calderas y son los encargados de transportar el bagazo proveniente de las bandas de hule hacia los chifles que llevan hacia los alimentadores de bagazo. Como su nombre lo indica son tablillas metálicas robustas, cuyo objetivo es soportar las cargas proporcionadas por el bagazo que proviene de los molinos con un porcentaje de humedad significativo.

## **1.5.2. Alimentadores de carbón**

Estos son los encargados de dotar de una constante alimentación de combustible a la caldera, la cantidad de alimentadores varía según el tamaño y capacidad de la caldera. La caldera 8 en ingenio Santa Ana cuenta con 10 alimentadores de carbón, cuyos lazos de control varían según la presión de vapor que se quiera lograr. El carbón que pasa por estos alimentadores viene de la parte superior de la misma; del silo de carbón circula a través de chifles hacia las básculas, para controlar y llevar un registro de su consumo por turno.

### **1.5.2.1. Transporte y almacenaje de carbón**

El carbón utilizado en la planta es transportado vía marítima hacia los puertos de Guatemala, donde se descargan y transportan en góndolas hacia el ingenio. En el ingenio las góndolas pasan por las básculas para llevar un control de la cantidad de carbón despachado, y llegan a la bodega de carbón ubicada en el bloque dos del Ingenio Santa Ana.

El carbón es descargado en dos tipos de bodegas:

- Bodega a cielo abierto: en este tipo de bodega el carbón está a la intemperie, expuesto a las inclemencias del clima; periódicamente cargadores frontales se encargan de trasegar el carbón hacia la otra bodega. Esto incurre en un mayor gasto en consumo de combustible y mano de obra, adicional al deterioro que sufre el carbón por la manipulación del transporte, fracturándose en el proceso e incrementando los finos del mismo, al momento de descargar hacia los silos de carbón de la caldera.
- Bodega cerrada: en este tipo de bodega el carbón se descarga en parrillas en las afueras de la bodega; es transportado al interior por un conductor de hule que lo eleva hasta la parte superior, descargándolo con la ayuda de un *tripper* desde la parte superior de la bodega. En esta el carbón sufre menos manipulación, debido que el proceso de descarga involucra menos movimiento con maquinaria pesada.

En la operación se trata la manera de reducir la manipulación del carbón, ya que a mayor manipulación se aumentan los finos, lo cual afecta la operación, reduciendo la eficiencia y aumentando los costos de operación.

#### **1.5.2.2. Conductores de carbón**

Estos conductores están conformados por una larga red de bandas de hule donde se hace circular el carbón desde las bodegas en el patio de almacenaje hasta el silo ubicado en la parte superior de la caldera; luego pasa por la trituradora que se encarga de reducir su tamaño.

### **1.5.2.3. Trituradora de carbón**

La planta cuenta con una trituradora de carbón de la marca Pennsylvania Crusher, que se localiza en medio de los conductores de carbón en su trayecto de la bodega de carbón hacia el silo; por lo tanto, en el silo de carbón de la caldera se tiene únicamente carbón triturado. La función primordial de esta es reducir de tamaño el carbón, permitiendo así una combustión más homogénea en el hogar de la caldera.

## **1.6. Inquemados**

Muchas veces durante la operación se dan sucesos que obligan a modificar los parámetros de operación de los equipos; cuando esto ocurre las reacciones de combustión no se realizan completamente, y en los gases de combustión aparecen los inquemados, sustancias como hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos, las cuales proceden de una combustión incompleta del combustible en el hogar de la caldera.

### **1.6.1. Tipos de inquemados**

Los inquemados se pueden clasificar en dos tipos:

- **Sólidos:** se producen a partir de combustibles sólidos o líquidos. Los cuales están formados mayoritariamente por hidrocarburos fraccionados y partículas de carbono. Estos suelen formarse fundamentalmente por tener insuficiente aire de combustión; debido a esto no se puede realizar una correcta reacción de combustión. Este tipo de inquemados se pueden apreciar a simple vista a la salida de la chimenea, apreciándose como un humo oscuro o en los conductos de humo con la presencia de hollín, lo cual

produce efectos perjudiciales en la caldera. Las partículas que no se queman se adhieren en las paredes de la caldera; esto crea una pared que disminuye la transferencia de calor de los gases al agua, provocando un incremento del uso de combustible para evaporar la misma cantidad de agua y aumentando la temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea, lo cual incide en un desaprovechamiento de los mismos.

- Inquemados gaseosos: este tipo de inquemados están formados por monóxido de carbono e hidrocarburos ligeros; se forman cuando se usa un gas como combustible. Las causas de formación más comunes pueden ser:
  - Mal suministro de aires: insuficiente aire para que exista una buena combustión en el hogar de la caldera.
  - Quemadores ineficientes: en las calderas que utilizan quemadores se puede dar un mal funcionamiento de los mismos.

Al tener como combustible un gas, la combustión es incompleta y puede producir elevadas concentraciones de monóxido de carbono y otros hidrocarburos. Entre los principales hidrocarburos puede citarse al metano ( $\text{CH}_4$ ), que en concentraciones elevadas puede provocar explosiones en su paso hacia la chimenea de la caldera o en los ductos de evacuación.

#### **1.6.1.1. Ceniza volante**

La ceniza volante se define como un polvo o arena muy fina, suave al tacto y de un color gris claro o negro. La presencia de carbón sin quemar origina colores oscuros. Sus características físicas y propiedades dependen de la composición química del combustible utilizado, el grado de pulverización o

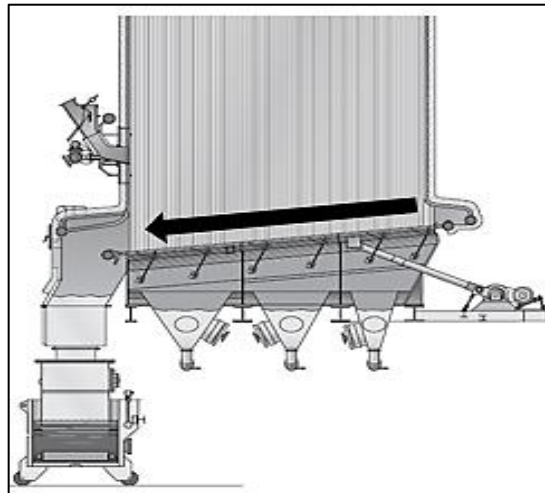


trituration del mismo, el tipo de caldera, las temperaturas de combustión dentro del hogar y el sistema por el cual las cenizas son retiradas de la caldera. Las cenizas volantes constituyen típicamente el 80 % del total de la ceniza producida por una caldera. El contenido de humedad de esta ceniza depende de la forma en que se deposite después de abandonar los filtros y precipitadores.

### 1.6.1.2. Ceniza de fondo

A diferencia de la ceniza volante esta se origina a partir de una partícula de mayor tamaño; se sedimenta en el fondo del hogar, fundiéndose y formando acumulaciones en forma de terrones que serán extraídos por los diferentes sistemas de limpieza de parrilla, ya sea con una parrilla viajera o una pinhole. La ceniza de fondo representa un aproximado del 20 % de la producción total de ceniza en la caldera.

Figura 7. **Ceniza de fondo y su desalojo de la caldera**



Fuente: Technology. *The Babcock*. <https://www.babcock.com/es-xl/technology/ash-material-handling> Visitado: Consulta: enero de 2020.

## **1.7. Sistema de condensados**

El sistema de condensados consta de una red de tuberías y bombas mecánicas, cuyo objetivo es la recirculación del condensado.

### **1.7.1. Desaireador**

Es un dispositivo mecánico que por medio de flujo contrario de vapor y condensado dividido en gotas o atomizado, separa el oxígeno disuelto y los gases incondensables contenidos en dicha agua.

### **1.7.2. Bombas de condensados**

Elemento mecánico necesario para transferir el condensado o vapor que ha cambiado de estado en el condensador y que ya no posee energía suficiente para conducirse por gravedad para continuar el ciclo.

El agua condensada es bombeada con la ayuda de las bombas de condensado a un tanque de alimentación del tren de generación de vapor; estas bombas deben aumentar la presión del agua, lo suficiente como para alcanzar el desaireador que se encuentra situado a gran altura, y para superar pérdidas de carga relacionadas con el paso por diversos accesorios y equipos.

### **1.7.3. Calentadores de agua de alimentación**

Los calentadores de agua de alimentación son intercambiadores de calor que toman vapor de extracción proveniente de la turbina, con el objetivo de elevar la temperatura del agua destinada a la caldera.

La temperatura del condensador ronda los 45 °C; como la entrada al tren de generación de vapor se realiza a una temperatura más elevada, es necesario aumentar progresivamente la temperatura desde los 45 °C, aproximadamente, hasta la temperatura de entrada en la caldera, que oscila entre los 100 y 200 °C. Por esto el agua proveniente del condensador pasa primero por calentadores de baja presión y al desaireador donde se le extrae el oxígeno y otros gases incondensables que son perjudiciales para la vida útil de la caldera y la turbina. Posteriormente llega a los calentadores de alta presión donde suben nuevamente de temperatura para que las bombas de alimentación se encarguen de inyectarla a la caldera.

#### **1.7.4. Bombas de agua de alimentación**

Las calderas de vapor transforman el agua suministrada de estado líquido a un vapor saturado o sobrecalentado según sea el diseño. Este cambio de estado se logra mediante la transferencia de calor proveniente del hogar de la caldera. El agua suministrada proviene de un desaireador y es incorporada a la caldera por la acción de las bombas de circulación.

Estas bombas de agua deben ser capaces de vencer la presión de operación de la caldera; son bombas de diseño robusto, capaces de soportar temperaturas elevadas a presiones considerables. Pueden ser de un impulsor o multietapas. El cuerpo de la bomba podría ser de fundición y el impulsor, de bronce o acero inoxidable.

Estas son de vital importancia en la operación, ya que se encargan de mantener el nivel del domo de la caldera; al estar operando, mantienen un suministro constante de agua. Es necesario cuidar la eficiencia de estas bombas, ya que de ellas dependen la presión de la caldera, y la generación de vapor.

### **1.7.5. Tanque de almacenamiento**

Los tanques de almacenamiento de agua están destinados únicamente para el almacenaje de agua cruda y agua desmineralizada, ya tratada con químicos para la protección de las calderas.

La generación de vapor depende directamente de la cantidad de agua que se le suministra a la caldera; es importante que el volumen de agua almacenada en el tanque de alimentación sea suficiente para mantener la operación; si hubiera inconvenientes con algún tubo roto, donde se tiene que bajar los niveles de agua, se deben realizar pruebas hidrostáticas para comprobación de las reparaciones.

## **1.8. Sistema de enfriamiento de agua**

Es el sistema encargado de eliminar el exceso de calor por cualquier medio a través de un intercambio térmico de agua y aire, a fin de reducir la temperatura hasta niveles próximos a la temperatura ambiente.

### **1.8.1. Torre de enfriamiento**

Las torres de enfriamiento son estructuras cuya función principal es la disminución de la temperatura del agua a la salida del condensador, extrayendo el calor por medios naturales o mecánicos. A estas torres es bombeada el agua que ha perdido energía por el proceso de condensación en el condensador, y se utiliza la evaporación del agua para rechazar el calor, llevándola hasta temperaturas adecuadas para realizar nuevamente el ciclo de circulación hacia la caldera y la turbina.

### **1.8.2. Planta de tratamiento de agua**

Durante el proceso que conlleva la generación de vapor resaltan aspectos bastante interesantes, de los cuales cada uno presenta riesgos; esto durante la operación de la caldera. El de mayor importancia es el tratamiento de agua, tanto en calderas pequeñas como en las de gran tamaño. El agua que se utiliza en las plantas es extraída de pozo; esta contiene impurezas que generan daños en la caldera; si se tiene incrustación en la tubería de las paredes de agua como resultado de un mal tratamiento de agua, se ocasionará una pérdida en la eficiencia de transferencia de calor, el costo de mantenimiento aumentará, se reducirá la vida útil de la caldera y habrá un mayor consumo de combustible.

El tratamiento del agua en las calderas es de vital importancia; un mal tratamiento del agua de alimentación de la caldera puede producir un deterioro temprano de la tubería de circulación del agua y en los alabes de la turbina. Al tratar el agua se añaden químicos en cantidades controladas, modificando las propiedades del agua, consiguiendo reducir los daños internos a las tuberías y a los alabes de la turbina.

Las impurezas pueden eliminarse según el tamaño de la instalación, presión de trabajo, cantidad de agua de repuesto o desmineralizada, y de las cantidades de agua cruda.

### **1.9. Turbogenerador eléctrico**

Es un generador eléctrico movido por una turbina hidráulica, de vapor o de gas. Es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes), transformando la energía mecánica en eléctrica.

### **1.9.1. Turbina**

La turbina es una máquina que se encarga de convertir la energía térmica proveniente del vapor en trabajo mecánico. La energía térmica almacenada se ve convertida en energía cinética, expandiendo el vapor desde una presión alta a otra baja después de su paso por la turbina. El vapor circula en la turbina en forma de chorro, y su conversión en trabajo ocurre cuando circula en una combinación de pasadizos o conductos estacionarios llamados toberas y en elementos giratorios llamados álabes; a esta combinación se le conoce como etapa, y una turbina dependiendo de su diseño y aplicación puede ser de una o más etapas.

El trabajo mecánico en el eje de la turbina se produce dirigiendo los chorros de vapor que salen de las toberas hacia los alabes que constituyen una corona montada en un rodete de rotor; a este conjunto también se le conoce como diafragmas; esa producción de trabajo contribuye también a la reacción dinámica del chorro al salir de los álabes giratorios.

Según la operación y lugar donde se realice la expansión del vapor, las turbinas se pueden clasificar en:

- Turbinas de acción: estas se caracterizan por tener poca caída de presión, a través de sus alabes móviles. En estas turbinas el vapor se expande a una presión menor en toberas estacionarias, alcanzando gran velocidad; luego el vapor fluye en los alabes móviles sin mayor expansión. La energía del vapor se transfiere por completo al rotor por medio de los chorros de vapor que chocan con los alabes móviles.

- Turbinas de reacción: en estas el vapor se expande a presiones menores, tanto en los alabes fijos como en los móviles; estos están diseñados para aprovechar la energía del flujo de vapor de los alabes estacionarios y para actuar también como toberas.

#### **1.9.1.1. Principales partes de la turbina**

La turbina se compone de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares para su funcionamiento. Dentro de las más importantes está el cuerpo del rotor donde están contenidas las coronas giratorias de alabes y la carcasa con las corinas fijas de toberas.

##### **1.9.1.1.1. Tobera**

La tobera es el órgano básico que convierte la energía de presión disponible en el vapor en energía cinética.

##### **1.9.1.1.2. Rotor**

Cuando se tiene una turbina de acción el rotor es normalmente de acero fundido con ciertas cantidades de níquel o cromo para darle tenacidad al mismo, y es de diámetro aproximadamente uniforme.

Los alabes se fabrican de acero inoxidable, aleaciones de cromo y hierro; con las curvaturas según diseño para la salida de vapor y las velocidades necesarias, según requerimientos del sistema.

#### **1.9.1.1.3. Carcaza**

La carcaza se divide en dos partes: la inferior, que está anclada al bancazo soportando el rotor con los alabes de la turbina, y la superior que es desmontable para el acceso al rotor. Ambas contienen coronas fijas de toberas. Las carcasas se fabrican de hierro, acero o aleaciones de este, dependiendo de la temperatura de operación; se encuentran recubiertas por mantas o concreto refractario para evitar la pérdida de energía por radiación.

#### **1.9.1.1.4. Sellos de aceite**

Estos sellos se forman por el sistema de lubricación de la turbina, creando una barrera y evitando la pérdida de vapor y entrada de aire del exterior en la operación.

#### **1.9.1.1.5. Sellos de vapor**

Las turbinas de vapor pueden estar equipadas con sellos de carbón que se ajustan al eje, laberintos de vapor o ambos. Con estos se consigue evitar que el vapor salga a la atmósfera, reduciendo la eficiencia térmica de la turbina.

#### **1.9.1.1.6. Chumaceras**

Sobre las chumaceras se encuentra soportado el rotor de la turbina, y sobre ellos gira el rotor. Suelen ser de un material blando y están recubiertos de una capa lubricante que disminuye la fricción. Son elementos de desgaste que deben ser sustituidos periódicamente.



## **1.9.2. Generador eléctrico**

Son máquinas destinadas a la transformación de energía mecánica en eléctrica; esta transformación es obtenida por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura llamada estator. Al producirse mecánicamente el movimiento relativo entre los conductores y el campo, se genera una corriente eléctrica.

### **1.9.2.1. Principales partes de un generador eléctrico**

A continuación, se describen las partes principales de un generador eléctrico.

#### **1.9.2.1.1. Excitatriz**

Este sistema consta de varias partes principales:

- Excitador: produce la corriente de campo del generador.
- Regulador de voltaje: controla la salida del excitador de acuerdo con las características propias del regulador.

El sistema de excitación de un generador es la fuente de corriente del campo de excitación, incluyendo los medios para su control.

Existen tres tipos de excitación que generalmente se utilizan:

- Excitadores estáticos
- Excitadores rotativos con carbones
- Excitadores rotativos sin carbones

Los excitadores estáticos no utilizan una fuente adicional que genere una corriente continua para el campo del generador, sino utilizan la energía del mismo generador principal, siendo así un sistema autoexcitado. El sistema de excitación estática produce la corriente de campo utilizando un convertidor de tiristores; luego conduce la corriente hacia el campo a través de anillos rozantes.

Los excitadores rotativos con carbones consisten en un generador de corriente directa, accionados por el eje del generador; utilizan un conmutador con carbones para producir la tensión y la corriente de excitación; luego la aplican al campo del generador a través de anillos deslizantes.

Los excitadores rotativos sin carbones consisten en un generador trifásico con bobinas de corriente alterna, montados en su rotor y el campo montado al estator, acoplados al eje del generador principal, la corriente alterna producida se rectifica por medio de rectificadores rotativos montados en el eje del generador principal. Con esto se evita el uso de conmutadores, anillos deslizante y carbones.

#### **1.9.2.1.2. Sistema de enfriamiento**

Este sistema se utiliza para disminuir la temperatura dentro del generador; está conformado por un sistema mixto en el cual el enfriamiento es producido por aire y agua; se hace circular agua por el enfriador para extraer el calor que contiene el aire que circula por el generador. El agua utilizada para este sistema es extraída de la torre de enfriamiento.

## **1.10. Sistema de distribución de energía eléctrica**

Este sistema comprende del conjunto de medios útiles y elementos para la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica. Está dotado de mecanismos de control, seguridad y protección.

Está constituido por un sistema conformado por elementos de control que garantizan una explotación racional de los recursos de generación y calidad de servicio, de acuerdo con las demandas de los usuarios; de esa manera podrán compensarse las posibles incidencias y fallas producidas. Tanto la red de transporte como las subestaciones asociadas podrán operarse o gestionarse a través de un ente diferente a las compañías propietarias de las centrales eléctricas.

### **1.10.1. Transformador**

Este es un elemento eléctrico que permite el aumento o disminución de la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, sin variar la potencia. Es utilizado en las subestaciones para elevar el voltaje hacia las líneas de distribución.

### **1.10.2. Líneas de transmisión**

Es la parte del sistema de suministro eléctrico constituido por los elementos necesarios que permiten llegar hasta los puntos de consumo a través de grandes distancias. Para esto se emplean subestaciones elevadoras en las cuales dicha transformación se efectúa empleando transformadores. Las líneas de transmisión emplean usualmente voltajes del orden de 220 kV y superiores; se denominan de alta tensión si el voltaje es de 400 o 500 kV.



## 2. FASE DE INVESTIGACIÓN. AHORRO DE AGUA

### 2.1. Diagnóstico situacional

Para toda planta generadora por medio de vapor es necesario el correcto tratamiento del agua; en ingenio Santa Ana se cuenta con dos bloques de generación, cada una con torres de enfriamiento. Al analizar el bloque dos de generación que cuenta con una caldera de 220 toneladas de vapor por hora, se observó que para dosificar la cantidad de químicos necesarios para desmineralizar el agua que circula por la caldera, tenía que purgarse periódicamente, dependiendo de la concentración de los químicos. Esta agua se dirigía hacia las zanjas sin oportunidad de aprovechamiento.

Figura 8. Agua descargada a zanjas



Fuente: elaboración propia, zanjas de descargue en instalaciones de Ingenio Santa Ana.

## **2.2. Proceso de tratamiento de agua y purgas**

Los turnos de trabajo en la planta se dividen en tres franjas de ocho horas; estos inician a las 06:00, 14:00 y 22:00 horas, respectivamente. Por cada turno se tiene un encargado del tratamiento del agua de las calderas, quien vela porque el agua de alimentación cumpla con las propiedades químicas necesarias para prevenir algún daño en la caldera o en la turbina.

Una vez por turno se toman muestras de agua para analizarlas y determinar la concentración de los químicos que se dosifican; cuando la concentración es muy alta y se necesita bajar algún parámetro, se abren válvulas al pie de la torre de enfriamiento, con el fin de diluir y bajar la concentración de químicos presentes, para posteriormente regenerar el agua desmineralizada.

## **2.3. Manejo de ceniza**

El sistema de fase densa de la planta está integrado por 17 tolvas, donde por procesos mecánicos se separa la ceniza que circula en los gases de combustión a la salida de la caldera; estos mecanismos son la solución para evitar la liberación de partículas volantes a la atmósfera, ya que con estos se puede optar a un mejor control de los desechos liberados por la combustión en el interior de la caldera.

### **2.3.1. Tolvas de recepción de ceniza**

Las tolvas de recepción de ceniza están ubicadas en la planta baja de la caldera; en estas se ve depositada toda la ceniza resultante del proceso de combustión en la caldera. Las mismas están en proceso continuo de llenado y de descarga, según el nivel.

Cuando se indica nivel alto en las tolvas, el sistema automáticamente purga la ceniza a través de un tanque de aire comprimido, el cual es llenado por tres compresores que están a disposición del sistema.

### **2.3.2. Silo de ceniza**

Este silo tiene una capacidad de 125 m<sup>3</sup>. En este se descarga la ceniza de todos los sistemas de la caldera evaporador, economizador, precalentador de aire, y precipitador electrostático. En su interior hay ceniza de diferentes características, algunas con presencias de material inquemado trazas de carbón o bagazo.

Figura 9. **Silo de ceniza**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

Toda la ceniza recolectada es descargada en góndolas que se encargan de transportar la ceniza hasta su punto de almacenaje.

#### **2.4. Acondicionamiento de ceniza**

La ceniza resultante del proceso de combustión es de consistencia muy fina; algunas veces los empaques del sistema encargado de descargar la ceniza hacia el silo, ceden. Estos empaques al ser de hule están expuestos al desgaste que la ceniza provoca por su paso hacia el silo de ceniza. La función de estos empaques de hule es crear las condiciones ideales para que, al aplicar aire comprimido a la línea, la ceniza sea dirigida por el sistema de tuberías hacia el silo; a la vez conforman un sello que impide que escape la presión de aire.

Al existir algún tipo de problema con la descarga de ceniza, la tolva se tiene que poner en *bypass*; la ceniza se acumula; muchas veces los niveles son tales que ya no es posible aplicar presión de aire para desalojar la ceniza en la tubería antes de llegar al silo. Cuando esto ocurre es necesario abrir registros y purgar la ceniza al suelo, liberando las líneas. Es necesario aplicar agua para apaciguar el polvillo, de manera que permita trabajar y realizar la limpieza adecuada del área.

La ceniza se deposita en el silo de ceniza y este al llenarse tiene que ser descargado por los operadores hacia las góndolas que la transportarán hacia una fosa.



Figura 10. **Descarga de ceniza a las góndolas**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

Al realizarse esa descarga, partículas de ceniza salen liberadas al ambiente, resultado de la resequeidad de la misma.

## 2.5. Ahorro de agua

Para aprovechar el agua que era desperdiciada de las purgas de la torre de enfriamiento, y que era descargada por un canal hacia zanjas del ingenio, se procedió a instalar una compuerta limitando el paso de agua hacia la zanja. Este canal actuó como tanque de almacenamiento, creando las condiciones necesarias para la instalación de la bomba.

Figura 11. **Compuerta instalada en canal**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

Posterior a la instalación de la compuerta se instaló una bomba con una capacidad de flujo de 210 galones por minuto; según datos técnicos del impulsor y la potencia del motor instalado. Al realizar el cálculo de la bomba para determinar si cumpliría con los requerimientos de carga a las que iba a someterse, fueron consideradas las pérdidas totales producidas por los diferentes accesorios en la instalación y por la fricción en la tubería, tanto en la succión como en la descarga.

Entonces, se tiene que:

$$h_L = \sum \text{Pérdidas por accesorios} + \sum \text{Pérdidas por fricción en tubería}$$

Para las pérdidas menores o por accesorios se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$h_{acc} = k \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

K = coeficiente de pérdidas singulares

V = velocidad del fluido

G = gravedad

Con la velocidad del agua en la tubería de 2", la cual es de 0,615 m/s con un caudal de 0,00125 m<sup>3</sup>/s, las pérdidas por accesorios se determinan de la manera que a continuación se describe.

Tabla I. **Pérdidas por accesorios, succión**

<b>Succión</b>			
<b>Accesorio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>K</b>	<b>h accesorios</b>
Pichacha	1	0,8	0,0154 mt
Codo de 90°	1	1	0,0193 mt
Unión universal	1	0,06	0,0012 mt
<b>Total</b>			<b>0,0359 mt</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Pérdidas por accesorios, descarga**

<b>Descarga</b>			
<b>Accesorio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>K</b>	<b>h accesorios</b>
Tee	6	1,5	0,1735 mt
Unión universal	1	0,06	0,0012 mt
Codo de 45°	3	0,3	0,0174 mt
Codo de 90°	10	1	0,1928 mt
Válvula de paso	1	0,2	0,0039 mt
Copla	14	0,06	0,0162 mt
<b>Total</b>			<b>0,4049 mt</b>

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene una pérdida por accesorios de 0,4408 mt.

Para el cálculo de las pérdidas por fricción en la tubería se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

F = coeficiente de fricción

L = longitud de la tubería

D = diámetro de la tubería

v = velocidad del fluido

Para el coeficiente de fricción se tiene que calcular el número de Reynolds, y conocer la rugosidad relativa del material; en este caso, hierro galvanizado. Se conoce que la rugosidad relativa para este material es de 0,15 mm.

Para determinar el número de Reynolds se utiliza la fórmula:

$$N_{Re} = \frac{v \times D}{\gamma}$$

Donde:

v = velocidad del fluido (m/s)

D = diámetro de la tubería (m)

$\gamma$  = viscosidad cinemática del fluido (m<sup>2</sup>/s)

Calculando el número de Reynolds se tiene que:

$$N_{Re} = \frac{0,615 \frac{m}{s} \times 0,051m}{0,0000008010 \frac{m^2}{s}} = 38\,989,07$$

Utilizando la tabla de coeficiente de fricción para la ecuación de Darcy-Weisbach, el número de Reynolds y la relación de la rugosidad relativa con el diámetro se tiene que:

$$N_{Re} = 38\,989,07$$

$$\frac{\epsilon}{D} = 0,00295$$

Se obtiene un valor de:

$$f = 0,029$$

Con estos valores se calculó la pérdida por fricción que se da en el tramo de tubería de 1,5 metros en la succión y de 75 metros en la descarga, para el sistema de acondicionamiento de ceniza.

Utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach se obtienen los siguientes resultados:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = 0,029 \times \frac{76,5 \text{ m}}{0,00015 \text{ m}} \times \frac{\left(0,615 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}$$

$$h_f = 0,8421 \text{ m}$$

La pérdida de energía generada por la fricción en la tubería es de 0,8421 metros. Con estos datos se obtiene la carga total de la bomba para el sistema.

De la ecuación de continuidad puede determinarse la cabeza de agua que debe aportar la bomba para el sistema con las condiciones de operación a las que se verá sometida y se tiene que:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_B - h_L = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma}$$

Donde:

$$z_1 = 1,5 \text{ m}$$

$$h_L = 1,28 \text{ m}$$

$$z_2 = 5,5 \text{ m}$$

$$v_1 = P_1 = 0$$

$$P_2 = 70 \text{ Psi} = 482,63 \text{ kPa}$$

$$h_B = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} - z_1 + h_L$$

$$h_B = 5,5 \text{ m} + \frac{\left(15,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + \frac{482,63 \text{ kPa}}{9,77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}} - 1,5 \text{ m} + 1,28 \text{ m}$$

$$h_B = 67,58 \text{ m}$$

Para el sistema se necesita una bomba con una capacidad mayor a los 67,58 m de pérdidas que hay en el mismo, para suplir la demanda de agua a la presión requerida.

El motor y la bomba instalada se tenían fuera de almacén; disponibles para cualquier futuro proyecto o emergencia; la mano de obra fue proporcionada por el ingenio; al ser realizado el proyecto en el bloque dos de generación, se contó con personal de turno para los trabajos mecánicos y de soldadura; los mismos se realizaron en los periodos del turno donde la demanda de responsabilidad en la caldera era baja. Se instaló el conjunto motor-bomba con las siguientes características:

Datos técnicos del motor:

Tabla III. **Datos técnicos del motor**

<b>Marca</b>	Weg	
<b>Modelo</b>	W22	
<b>Potencia</b>	20 Hp	15 kW
<b>RPM</b>	3535	
<b>Eficiencia nominal</b>	90,80 %	

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por ingenio Santa Ana.

Datos técnicos de la bomba:



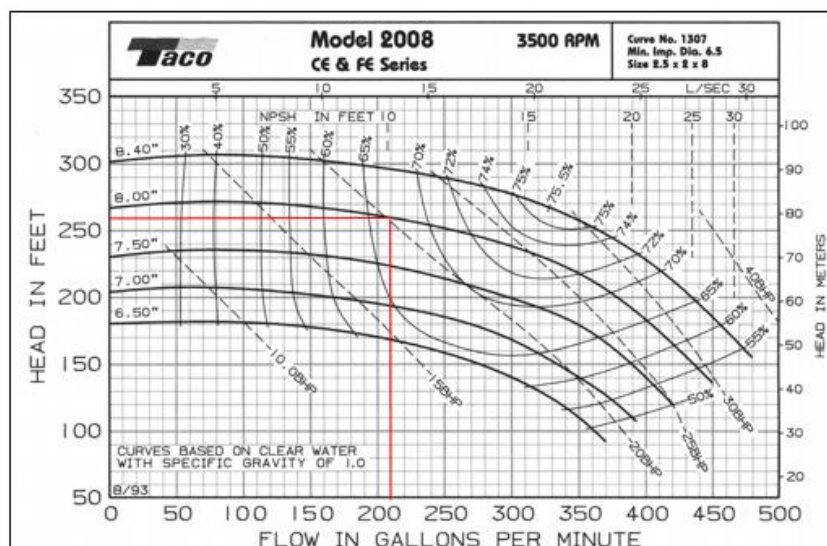
Tabla IV. Datos técnicos de la bomba

<b>Marca</b>	Taco
<b>Modelo</b>	FE2008E2F1F2LOA
<b>Tipo</b>	Centrífuga
<b>Tamaño</b>	2"x2-1/2"x8"

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por ingenio Santa Ana.

Con los datos técnicos del motor, el tamaño de impulsor de la bomba y la curva proporcionada por el fabricante, se tiene que:

Figura 12. Curva de diseño según fabricante



Fuente: Taco Inc. Información técnica de bombas series CE y FE. p. 3.

Con un motor de 20 Hp y la bomba de la marca Taco con un impulsor de 8 pulgadas, se tiene que la bomba proporcionará un flujo por minuto de 210 galones y una capacidad de 260 pies en cabeza de agua. La bomba

necesaria para el sistema de ceniza tenía que ser de 221,71 pies, con lo cual se asegura una buena circulación de agua hacia el silo de ceniza. Con el caudal aportado por la bomba instalada se tiene capacidad para suplir la cantidad de:

$$Agua\ suministrada = 210 \frac{Gal}{min} * 1,5\ Hora * \frac{60\ min}{Hora} = 18\ 900\ galones$$

Esta cantidad está ligada al consumo de agua de limpieza en donde se tardan una hora y media promedio en realizar las labores de limpieza en el primer nivel de la caldera. Con esta bomba se tiene capacidad para suplir totalmente la utilización de agua de pozo, que antes de la instalación era la destinada para estos usos.

### **2.5.1. Áreas donde se utiliza agua**

En la planta por turno se realiza una limpieza general de la caldera, siendo las principales áreas las siguientes:

- Tolvas recolectoras de ceniza
- Banda de ceniza húmeda
- Área de ventiladores
- Silo de ceniza
- Escaleras torre conductores

### 2.5.2. Consumo de agua en limpieza y riego

Una vez por turno se realiza la limpieza de todo el primer nivel de la caldera; en época de zafra se acumula bagazo y en no zafra, carbón. Este combustible cae de los conductores de bagazo y carbón, respectivamente; mantener estas acumulaciones de combustible puede resultar en conatos de fuego que pudieran propiciar algún incendio con efectos de mayor impacto al proceso y a la salud de los colaboradores. En promedio se utilizan 30,86 galones por minuto, y en una lavada por turno se tendría:

$$\text{Agua utilizada} = 30,86 \frac{\text{Gal}}{\text{min}} * 1,5 \text{ Hora} * \frac{60 \text{ min}}{\text{Hora}} = 2\,770,4 \text{ galones}$$

Por turno se utilizan 2 770,4 galones, aproximadamente. En total son tres turnos:

$$2,770.4 \frac{\text{Gal}}{\text{Turno}} * 3 \frac{\text{Turnos}}{\text{Día}} = 8,332.2 \frac{\text{Gal}}{\text{Día}}$$

En un día de producción de la planta se utilizan 8,332.2 galones de agua para limpieza de áreas de la caldera y dosificación en el silo de ceniza.

### 2.6. Instalación de bomba para reutilización de agua

Se fabricó bancazo para el conjunto motor bomba, se aplicó *grouting* en el bancazo para transmitir uniformemente los esfuerzos de la máquina hacia la fundición.

Figura 13. **Aplicación de *grouting* para bancazo**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

Figura 14. **Bancazo de motor-bomba**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

Figura 15. **Instalación motor-bomba**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

## 2.7. **Instalación de tubería para conducción de agua**

Se utilizó tubería de hierro galvanizado de 2" de diámetro, proporcionada por el almacén del ingenio.

Figura 16. **Instalación de tubería para descarga**



Fuente: elaboración propia, instalación de tubería, Ingenio Santa Ana.

Figura 17. **Línea succión y descarga de bomba**



Fuente: elaboración propia, instalaciones de ingenio Santa Ana.

## **2.8. Instalación de sistema para acondicionador de ceniza**

En el acondicionador de ceniza se instalaron 10 boquillas con capacidad de 1,58 galones por minuto, según hoja técnica de las mismas; se utilizó un factor de seguridad de 1,25, por lo que se tendría un caudal de 19,75 galones por minuto.

Figura 18. **Motor-bomba acondicionador de ceniza**



Fuente: elaboración propia, motor-bomba instalado. Ingenio Santa Ana.





### **3. FASE TÉCNICO PROFESIONAL. REINYECCIÓN DE INQUEMADOS**

#### **3.1. Descripción del sistema en el área de calderas de la planta**

En el bloque dos de generación de energía eléctrica se tiene la caldera 08, que está diseñada para operar con biomasa, aprovechando el residuo de la caña de azúcar llamado bagazo que se recolecta en época de zafra. Para cuando no hay corte de caña o no zafra se utiliza carbón mineral triturado.

El proceso de combustión genera diferentes residuos, los cuales varían en función de la carga solicitada por el ente regulador; en este caso la administradora del mercado mayorista AMM, a una carga alta aumenta la cantidad de combustible suministrada por hora; esto con el fin de suplir con las condiciones de presión y temperatura para entregar el flujo de vapor necesario a la turbina y así generar la carga solicitada; con esto los residuos de la combustión aumentan. Los diferentes residuos de la caldera son transportados hacia puntos de almacenaje ubicados en propiedades del ingenio; la movilización de estos residuos conlleva un costo de recurso humano, así como de maquinaria y equipos.

#### **3.2. Tratamiento del combustible**

El manejo del combustible toma mucha importancia al momento de realizarse la combustión en la caldera; si se tiene un combustible tratado de una manera incorrecta sin los cuidados de manejo y almacenaje respectivo, se obtiene un carbón con muchos finos, los cuales son contraproducentes en la

eficiencia de la caldera, ya que aumentan el consumo de combustible y realizan un proceso de combustión ineficiente dentro del hogar.

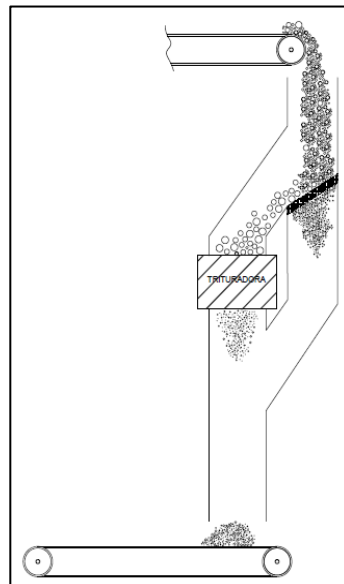
### 3.2.1. Recepción y almacenamiento del carbón

A continuación, se describe el proceso de recepción y almacenamiento del carbón, a través de la trituración del bagazo de caña.

#### 3.2.1.1. Trituración

La trituración del carbón se da en cada trasiego de las bodegas al silo de carbón por llenado del mismo; el carbón es conducido por un chifle en el cual llega hasta un colador, en donde separa el carbón mayor a 10 mm.

Figura 19. Trituración del carbón



Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCAD.

### 3.2.2. Recepción del bagazo de caña

El bagazo de caña es el resultante de la extracción de jugo en los molinos; este llega a la caldera con una humedad promedio de 47,7 %.

El bagazo no utilizado es recirculado por medio de los conductores hacia la bagacera, en la cual cargadores frontales se encargan de su correcto almacenaje bajo techo, protegiéndolo de las condiciones climáticas. Con esto se asegura un combustible en óptimas condiciones.

### 3.3. Resultados de laboratorio

Para estos análisis se obtuvo el apoyo del laboratorio del ingenio y del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. Utilizando una bomba calorimétrica se analizaron las muestras sólidas recolectadas directamente de las tolvas de ceniza de la caldera. La bomba calorimétrica es usada para determinar el poder calorífico de un combustible sólido cuando se quema a volumen constante. Se analizaron los siguientes escenarios y se utilizó como combustible el bagazo, únicamente. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla siguiente.

Tabla V. Resultados en operación con bagazo

Fecha	Lugar	% cenizas	% inquemado	% humedad
25/04/2019	Evaporador	43	55	2
30/04/2019	Evaporador	65	32	3
<b>Promedio evaporador</b>		<b>54</b>	<b>44</b>	<b>3</b>
25/04/2019	Economizador	84	16	1
30/04/2019	Economizador	93	6	1

Continuación de la tabla V.

<b>Promedio economizador (PDC)</b>		<b>88</b>	<b>11</b>	<b>1</b>
25/04/2019	Precaentador	77	22	1
<b>Promedio precalentador (APH)</b>		<b>77</b>	<b>22</b>	<b>1</b>
25/04/2019	Precipitador	92	7	1
30/04/2019	Precipitador	95	5	1
<b>Promedio precipitador (ESP)</b>		<b>93</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
25/04/2019	Silo	78	21	1
30/04/2019	Silo	80	18	1
<b>Promedio silo</b>		<b>79</b>	<b>20</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Utilizando como combustible únicamente carbón se obtiene:

Tabla VI. **Resultados de evaporador**

<b>100 % carbón</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
23/05/2019	Evaporador	9	89	2
30/05/2019	Evaporador	23	76	1
05/06/2019	Evaporador	15	85	1
13/06/2019	Evaporador	13	86	1
20/06/2019	Evaporador	21	78	1
<b>Promedio evaporador</b>		<b>16</b>	<b>83</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados de economizador (PDC)**

<b>100 % carbón</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
23/05/2019	Economizador	36	62	2
30/05/2019	Economizador	42	56	1
05/06/2019	Economizador	28	71	1
13/06/2019	Economizador	28	71	1
20/06/2019	Economizador	33	66	1
<b>Promedio economizador (PDC)</b>		<b>33</b>	<b>65</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados de precalentador de aire**

<b>100 % carbón</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
23/05/2019	Precalentador	45	52	3
05/06/2019	Precalentador	56	42	1
13/06/2019	Precalentador	54	45	1
20/06/2019	Precalentador	80	19	1
<b>Promedio precalentador (APH)</b>		<b>59</b>	<b>40</b>	<b>2</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados de precipitador electrostático**

<b>100 % carbón</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
23/05/2019	Precipitador	71	27	1
30/05/2019	Precipitador	70	28	1
05/06/2019	Precipitador	63	36	1
13/06/2019	Precipitador	66	33	1
20/06/2019	Precipitador	68	31	1
<b>Promedio precipitador (ESP)</b>		<b>68</b>	<b>31</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados de silo de ceniza**

<b>100 % carbón</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
23/05/2019	Silo	35	63	1
30/05/2019	Silo	43	56	1
05/06/2019	Silo	34	65	1
13/06/2019	Silo	37	62	1
20/06/2019	Silo	26	73	1
<b>Promedio silo</b>		<b>35</b>	<b>64</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Cuando se utiliza una mezcla de combustible para la caldera de biomasa de un 70 % bagazo y un 30 % carbón se tiene que:

Tabla XI. **Resultados de evaporador mezcla 70/30**

<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
21/03/2019	Evaporador	24	74	2
28/03/2019	Evaporador	12	86	2
04/04/2019	Evaporador	12	86	2
12/04/2019	Evaporador	60	37	4
<b>Promedio evaporador</b>		<b>27</b>	<b>71</b>	<b>3</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados de economizador mezcla 70/30**

<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
21/03/2019	Economizador	76	23	2
28/03/2019	Economizador	45	52	3
04/04/2019	Economizador	72	26	2
12/04/2019	Economizador	87	12	1
<b>Promedio economizador (PDC)</b>		<b>70</b>	<b>28</b>	<b>2</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados de precalentador de aire mezcla 70/30**

<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
21/03/2019	Precalentador	86	12	2
28/03/2019	Precalentador	90	9	1
04/04/2019	Precalentador	77	20	3
12/04/2019	Precalentador	76	22	2
<b>Promedio precalentador (APH)</b>		<b>82</b>	<b>16</b>	<b>2</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados de precipitador electroestático mezcla 70/30**

<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% inquemado</b>	<b>% humedad</b>
21/03/2019	Precipitador	86	13	1
28/03/2019	Precipitador	85	14	1
04/04/2019	Precipitador	86	12	2
12/04/2019	Precipitador	90	10	1
<b>Promedio precipitador (ESP)</b>		<b>87</b>	<b>12</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.



Tabla XV. **Resultados de silo de ceniza mezcla 70/30**

Fecha	Lugar	% cenizas	% inquemado	% humedad
21/03/2019	Silo	69	30	1
28/03/2019	Silo	81	18	1
04/04/2019	Silo	76	22	2
12/04/2019	Silo	80	19	1
<b>Promedio silo</b>		<b>76</b>	<b>22</b>	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Con estos resultados obtenidos se observa que la mayor cantidad de inquemados se encuentra en el evaporador.

Tabla XVI. **Resumen de resultados**

Cenicero	% Inquemados		
	70 % bag + 30 % carbón	100 % bagazo	100 % carbón
<b>Evaporador</b>	<b>71</b>	<b>44</b>	<b>83</b>
Economizador (PDC)	28	11	<b>65</b>
Pre calentador (APH)	16	22	<b>40</b>
Precipitador (ESP)	12	6	<b>31</b>
Silo	22	20	<b>64</b>

Fuente: elaboración propia.

Se concluye que el evaporador es el que más oportunidad de ahorro representa, y que de los diferentes escenarios de operación en donde se obtendrá un mayor beneficio es en la época de no zafra, donde no se está consumiendo bagazo y se opera completamente con carbón.

### 3.3.1. Poder calorífico de la ceniza

Analizando las muestras recolectadas de la caldera y utilizando una bomba calorimétrica se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XVII. Poder calorífico de la ceniza

Lugar	Poder calorífico MJ/kg	Poder calorífico BTU/LB
Evaporador	23,7	10 180,6
Economizador (PDC)	2.2	950.1
Precalentador (APH)	*	*
Precipitador (ESP)	1,8	765,3
Silo	4,0	1702,5

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Diagnóstico de la situación

Se analizaron diferentes escenarios de alimentación de combustible: en zafra se utilizó una mezcla de 70 % de bagazo y 30 % de carbón, por lo que en promedio se consumían 1 370 TM de bagazo y 144 TM de carbón. En no zafra únicamente se utiliza carbón y en promedio se consumía un aproximado de 611,75 TM de carbón.

La ceniza proveniente del evaporador muestra mayor presencia de carbón sin quemar; este sería aprovechable para el proyecto; limitándose únicamente a los inquemados en el evaporador.

### **3.4.1. Temporada de zafra**

A continuación, se describe todo el proceso de producción de ceniza en temporada de corte de caña de azúcar.

#### **3.4.1.1. Determinación de producción de ceniza en temporada de zafra**

Para la generación de vapor de la caldera 08 se tiene la configuración de la mezcla de combustible en un 70 % de bagazo de caña y 30 % de carbón mineral, para la producción de vapor hacia la turbina. Esta mezcla como tal, se incinera en el interior del hogar de la caldera, produciendo el calor necesario para elevar la temperatura del agua contenida en el interior de los tubos de las paredes de la caldera hasta su ebullición, y, por tanto, para la producción de vapor.

Durante la combustión del carbón mineral y del bagazo de caña se producen gases de combustión y cenizas.

Para determinar la cantidad de ceniza, existen varios métodos de cálculo, entre los cuales se pueden mencionar los métodos de aforo y el teórico, para estimación de la ceniza producida.

Para comprobar la cantidad de ceniza producida por el método de aforo, se sabe que el silo de ceniza seca tiene una capacidad de 125 metros cúbicos y en el momento que se llena por alto nivel, es descargado en góndolas, para luego ser pesados en báscula. Como se detalla en la tabla siguiente:

Tabla XVIII. **Cantidad de ceniza producida**

Fecha	Cantidad de ceniza	
	Libras	Toneladas
08/01/2019	137 891,30	63,43
09/01/2019	147 021,74	67,63
10/01/2019	270 086,95	124,24
11/01/2019	241 913,05	111,28
12/01/2019	107 195,65	49,31
13/01/2019	235 565,22	108,36
14/01/2019	147 149,18	67,69
15/01/2019	29 369,57	13,51
16/01/2019	98 304,34	45,22
17/01/2019	46 434,78	21,36
18/01/2019	189 521,74	87,18
19/01/2019	217 934,78	100,25
20/01/2019	25 695,65	11,82
<b>Promedio</b>	<b>145 698,77</b>	<b>67,02</b>

Fuente: elaboración propia.

Para determinar los datos de producción de ceniza por medio del método teórico, se toman como referencia los valores de laboratorio de fábrica para el bagazo de caña y también los valores del análisis próximo del carbón mineral.

Para los días del 08 al 20 de enero de 2019, los valores promedio para el bagazo de *trash* mineral fueron los siguientes:

Tabla XIX. Valores de *trash* mineral

Día de zafra	TANDEM "A"	TANDEM "B"
	<i>Trash</i> mineral bagazo	<i>Trash</i> mineral bagazo
056 - 08/01/2019	4,73	3,04
057 - 09/01/2019	7,46	3,82
058 - 10/01/2019	4,41	4,09
059 - 11/01/2019	4,81	3,75
060 - 12/01/2019	5,06	3,23
061 - 13/01/2019	4,65	3,32
062 - 14/01/2019	3,70	3,54
063 - 15/01/2019	2,09	2,70
064 - 16/01/2019	3,98	2,69
065 - 17/01/2019	2,57	3,18
066 - 18/01/2019	3,22	3,14
067 - 19/01/2019	3,33	2,88
068 - 20/01/2019	3,15	2,59
<b>Promedio</b>	<b>4,09</b>	<b>3,23</b>

Fuente: elaboración propia.

Promedio total: 3,66

Los datos del carbón mineral se toman del análisis próximo del carbón por embarque; a continuación, los datos obtenidos:

Tabla XX. **Datos de análisis carbón según fabricante**

<b>% ash</b>	7,95 %
<b>Carbón Losses</b>	4 %
<b>% tierra</b>	

Fuente: elaboración propia.

En conclusión, se obtienen los siguientes datos de laboratorio de caña y carbón mineral:

Tabla XXI. **Datos análisis de combustibles**

<b>Combustible</b>	<b>Carbón</b>	<b>Bagazo</b>
<b>% ash</b>	7,95 %	0,00 %
<b>Losses</b>	4 %	0,0 %
<b>% tierra</b>		3,66 %

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos de laboratorio y los análisis próximos, se calcula la producción de ceniza con base en el método teórico; se presentan los aforos de ceniza por día en la tabla siguiente.

Tabla XXII. **Producción de ceniza**

<b>Descripción</b>	<b>Consumo total de carbón</b>	<b>Bagazo consumido por C-8</b>	<b>Ceniza total teórica (TM)</b>	<b>Aforos de ceniza por día (TM)</b>
08/01/2019	213	1,393	76,39	63,43
09/01/2019	218	1,332	74,84	67,63
10/01/2019	176	1,271	67,57	124,24
11/01/2019	109	976	48,71	111,28
12/01/2019	123	912	48,09	49,31
13/01/2019	115	1,618	72,96	108,36
14/01/2019	129	1,332	64,20	67,69
15/01/2019	65	1,202	51,72	13,51
16/01/2019	150	1,570	75,35	45,22
17/01/2019	159	1,547	75,62	21,36
18/01/2019	156	1,551	75,40	87,18
19/01/2019	138	1,649	76,80	100,25
20/01/2019	122	1,462	68,06	11,82
<b>Promedios</b>	<b>144,07</b>	<b>1,370</b>	<b>67,36</b>	<b>67,02</b>

Fuente: elaboración propia.

En conclusión, se estimó que en los 12 días de prueba se tuvo una producción de ceniza promedio con el cálculo teórico de 67,36 TM y en los aforos diarios de 67,02 TM.

### 3.4.1.2. Determinación de porcentaje LOI (*lost of ignition*)

El valor LOI (*lost of ignition*) representa la masa de combustible sin quemar en la ceniza producida por la combustión de la mezcla de bagazo de caña y carbón mineral. Estos valores constituyen también el porcentaje de eficiencia de la combustión; si los valores son elevados, la combustión es ineficiente; pero también existen otros factores que afectan en la producción de inquemados, como el porcentaje de finos, la humedad y condiciones de operación.

A continuación, se detallan los resultados LOI determinados en el laboratorio de caña:

Tabla XXIII. **Resultados LOI para evaporador**

<b>Día de zafra</b>	<b>Ceniza evaporador LOI MUFLA</b>
056 - 08/01/2019	78,64
057 - 09/01/2019	61,36
058 - 10/01/2019	69,87
059 - 11/01/2019	70,67
060 - 12/01/2019	34,56
061 - 13/01/2019	43,45
062 - 14/01/2019	35,72
063 - 15/01/2019	55,03
064 - 16/01/2019	71,66
065 - 17/01/2019	81,85
066 - 18/01/2019	58,86
067 - 19/01/2019	53,46
068 - 20/01/2019	72,67
Promedio	60,60

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del laboratorio de caña, ingenio Santa Ana.



### 3.4.1.3. Determinación de la cantidad de ceniza con alto contenido de carbón mineral para reinyección

Se tiene que para el Slave 1 del evaporador, para completar el total del volumen de 7,58 Ft<sup>3</sup>, se realizó en un tiempo de 55 minutos en el Slave 1 y 60 en el máster; entonces la razón del flujo másico quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Slave 1: } \frac{46,33 \text{ Kg}}{55 \text{ min} * \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}}} = 50,54 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}}$$

$$\text{Máster: } \frac{46,31 \text{ Kg}}{60 \text{ min} * \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}}} = 46,31 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}}$$

El total de ceniza producido por el evaporador es 96,85 Kg/Hr; entonces, durante 24 horas se producen 2,32 TM, que representan el 3,46 %. Si se estiman 180 días de operación a esta razón de producción de ceniza del evaporador, se obtendrían 417,6 TM.

### 3.4.1.4. Determinación de la cantidad de carbón que no se está aprovechando

Determinando la cantidad de carbón inquemado que contiene la ceniza producida por la combustión, se aprovecharía introduciéndolo nuevamente a la caldera para la producción de vapor. Para estimar la cantidad de carbón mineral se conoce el dato del valor LOI y también la producción diaria de ceniza del evaporador. Se calculará el valor equivalente de la siguiente manera:

Producción de ceniza en 180 días de operación: 417,6 TM

Valor promedio LOI: 60,60

$$417,6 \text{ TM} \times 60,60 \% = 253,06 \text{ TM}$$

El resultado de ceniza con alto contenido de carbón mineral que no se está aprovechando es de 253,06 TM. Suponiendo un periodo de 180 días de operación.

### **3.4.2. Temporada de no zafra**

En temporada de no zafra se trabaja únicamente con carbón mineral y el comportamiento de la ceniza varía en función de la calidad del combustible que se alimenta.

#### **3.4.2.1. Determinación de producción de ceniza en temporada de no zafra**

En temporada de no zafra, también conocida como temporada de mantenimiento se pasa a la configuración de combustible en un 100 % de carbón mineral, para la producción de vapor hacia la turbina; el carbón mineral es almacenado en las dos bodegas ubicadas en el ingenio y es transportado en los cargadores frontales hacia las bandas transportadoras, que se encargan de suministrarlo a la caldera.

La ceniza que se produce en el proceso de combustión con carbón es de composición más granular que la que se extrae con bagazo, que es una composición de partícula más fina. Se mantiene el silo de ceniza seca con una capacidad de 125 metros cúbicos, y se tiene el mismo procedimiento de descarga a las góndolas.

En la tabla siguiente se detalla el total de toneladas en 13 días de mantenimiento del periodo de mantenimiento 2019:

Tabla XXIV. **Cantidad de ceniza producida con carbón**

Fecha	Cantidad de ceniza	
	Libras	Toneladas
06/06/19	231 660,00	115,83
07/06/19	283 140,00	141,57
08/06/19	257 400,00	128,7
09/06/19	205 920,00	102,96
10/06/19	231 660,00	115,83
11/06/19	257 400,00	128,7
12/06/19	257 400,00	128,7
13/06/19	231 660,00	115,83
14/06/19	231 660,00	115,83
15/06/19	205 920,00	102,96
16/06/19	180 180,00	90,09
17/06/19	283 140,00	141,57
18/06/19	283 140,00	141,57
<b>Promedio</b>	<b>2 415,60</b>	<b>120,78</b>

Fuente: elaboración propia.

Se determinan los datos de producción de ceniza con el método teórico, y se toman en cuenta los valores de análisis próximos del carbón mineral, por embarque. A continuación, se presentan los datos obtenidos:

Tabla XXV. **Datos de análisis próximo del carbón**

<b>% Ash</b>	7,95 %
<b>Carbón Losses</b>	4 %
<b>%Tierra</b>	-

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos de los análisis próximos, se tiene la siguiente tabla. donde se calcula la producción de ceniza, con base en el método teórico:

Tabla XXVI. **Producción de ceniza con carbón**

<b>Fecha</b>	<b>Consumo de carbón TM</b>	<b>Ceniza total teórica (TM)</b>	<b>Aforos de ceniza por día (TM)</b>
06/06/19	696,40	115,83	114,25
07/06/19	617,50	141,57	130,28
08/06/19	700,10	128,7	130,60
09/06/19	531,40	102,96	96,52
10/06/19	659,60	115,83	110,25
11/06/19	677,00	128,7	135,60
12/06/19	657,70	1287	122,68
13/06/19	529,20	115,83	112,35
14/06/19	544,90	115,83	120,74
15/06/19	543,60	102,96	119,26
16/06/19	405,60	90,09	89,95
17/06/19	687,40	141,57	140,32
18/06/19	702,40	141,57	145,27
<b>Promedio</b>	<b>611,75</b>	<b>120,78</b>	<b>120,62</b>

Fuente: elaboración propia.

En conclusión, se estimó que en los 13 días de prueba se tuvo una producción de ceniza promedio con el cálculo teórico de 120,78 TM y en los aforos diarios de 120,62 TM.

### 3.4.2.2. Determinación de porcentaje LOI (*lost of ignition*) temporada de no zafra

El valor LOI (*lost of ignition*) representa la masa de combustible sin quemar en la ceniza producida por la combustión en esta época, únicamente carbón mineral. Estos valores representan también el porcentaje de eficiencia de la combustión, si los valores son elevados la combustión es ineficiente, pero también existen otros factores que afectan en la producción de inquemados, como el porcentaje de finos, la humedad y condiciones de operación. A continuación, se detallan los resultados LOI determinados por el laboratorio.

Tabla XXVII. Valores LOI para ceniza de carbón

Día zafra	Ceniza evaporador LOI MUFLA
205 - 06/06/2019	88,02
206 - 07/06/2019	82,48
207 - 08/06/2019	80,33
208 - 09/06/2019	89,61
209 - 10/06/2019	91,99
210 - 11/06/2019	81,38
211 - 12/06/2019	82,19
212 - 13/06/2019	87,46
213 - 14/06/2019	92,22
214 - 15/06/2019	86,58
215 - 16/06/2019	89,71
216 - 17/06/2019	89,83
217 - 18/06/2019	91,03
<b>PROMEDIO</b>	<b>87,14</b>

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos laboratorio de caña, Ingenio Santa Ana.

### 3.4.2.3. Determinación de la cantidad de ceniza con alto contenido de carbón mineral para reinyección en temporada de no zafra

Se tiene que para el Slave 1 del evaporador, para completar el total del volumen de 7,58 Ft<sup>3</sup>, se realizó en un tiempo de 30 minutos en el Slave 1 y 35 minutos en el máster; entonces la razón del flujo másico quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Slave 1: } \frac{46.33 \text{ Kg}}{30 \text{ min} * \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}}} = 92,66 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}}$$

$$\text{Master: } \frac{46.31 \text{ Kg}}{35 \text{ min} * \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}}} = 79,84 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}}$$

El total de ceniza producido por el evaporador es 172,5 Kg/Hr; durante el periodo de 24 horas se produce un total 4,14 TM, que representaría el 3,43 % de cenizas producidas. Si se estiman 180 días de operación a esta razón de producción de ceniza del evaporador, se obtendrían 745,2 TM.

### 3.4.2.4. Determinación de la cantidad de carbón que no se está aprovechando en temporada de no zafra

Determinando la cantidad de carbón inquemado que contiene la ceniza producida por la combustión, se aprovecharía introduciéndolo nuevamente a la caldera para la producción de vapor. Para estimar la cantidad de carbón mineral, ya se conoce el dato del valor LOI y también la producción diaria de ceniza del evaporador. Se calculará el valor equivalente de la siguiente manera:

*Producción de ceniza en 180 días de operación: 745,2 TM*

*Valor promedio LOI: 87,14 %*

$$745,2 \text{ TM} \times 87,14 \% = 649,36 \text{ TM}$$

El resultado de ceniza con alto contenido de carbón mineral que no se está aprovechando es de 649,36 TM, suponiendo un periodo de 180 días de operación.

### **3.5. Efecto económico de la pérdida de carbón mineral sin quemar**

Estimando el poder calorífico del carbón inquemado en la ceniza se tiene un valor de 10 180,58 BTU/LB. Suponiendo un periodo de 180 días de operación, se obtiene la cantidad de carbón que se deja de aprovechar:

Poder calorífico del carbón inquemado en la ceniza: 10 180,58 BTU/LB.

Ceniza con alto contenido de carbón mineral: para los dos periodos se tiene un total de ceniza con alto contenido de carbón de:

Temporada de zafra: 253,06 TM

Temporada de no zafra (reparación): 649,36 TM

Poder calorífico del carbón mineral: 11 800 BTU/LB.

Para la temporada de zafra se tiene que:

$$\frac{417,6 \text{ TM} \times 60,60 \% \times 10 \text{ 180,58 BTU/LB}_{\text{inquemado}}}{11 \text{ 800 BTU/LB}_{\text{carbón}}} = 218,33 \text{ TM de carbón}$$

Para la temporada de no zafra:

$$\frac{745,2 \text{ TM} \times 87,14 \% \times 10 \text{ 180,58 BTU/LB}_{\text{inquemado}}}{11800 \text{ BTU/LB}_{\text{carbón}}} = 560,24 \text{ TM de carbón}$$

Con la reinyección de la ceniza con carbón inquemado para la combustión de la caldera, se disminuiría el consumo de carbón mineral en 218,33 TM en temporada de zafra y de 560,24 TM en temporada de no zafra durante los 180 días de operación que dura cada periodo; sabiendo que el precio del carbón mineral en el mercado es de 110 USD, se tendría un ahorro de 24 016,3 USD para la temporada de zafra y 61 626,4 USD para la temporada de no zafra (reparación). Esto da un total de 85 642,7 USD en periodo de generación eléctrica, de acuerdo con la programación del despacho del administrador de mercado mayorista.

### **3.6. Ahorro de carbón con base en poder calorífico con la reinyección de ceniza**

Utilizando el poder calorífico del carbón de reciente embarque y de la ceniza resultante a la salida del evaporador, se tiene que el ahorro de carbón sería de 218,33 toneladas métricas de carbón en aproximadamente 180 días de operación en temporada de zafra; por tanto, se tendría un ahorro por turno de:

$$218,33 \frac{\text{TM}}{\text{Zafra}} \times \frac{\text{Zafra}}{180 \text{ días}} = 1,21 \text{ TM por día}$$



Para temporada de no zafra se tendría:

$$560,24 \frac{TM}{Zafra} \times \frac{Zafra}{180 \text{ días}} = 3,11 \text{ TM por día}$$

Por día en temporada de zafra se tendría una reducción de 1,21 toneladas métricas de consumo de carbón y para la temporada de no zafra un total de 3,11. Si se toma el costo del carbón de 110 dólares la tonelada métrica se tendría que:

- Zafra: 133,1 USD/día
- No zafra: 342,11 USD/día

### **3.7. Operación del aire primario, secundario y forzado en las calderas**

En la operación hay varios factores que influyen en la variación de parámetros para los ventiladores de la caldera. La calidad del combustible es considerada como la principal.

En la temporada de zafra, al usar bagazo de caña como combustible se está sujeto a las condiciones con las que este salga de los molinos; algunas veces el bagazo puede llegar húmedo a la caldera, ya que es usada mucha agua en la salida del molino como lavado, esto para evitar la presencia de jugo utilizable en la producción de azúcar en el bagazo que se destina para la alimentación de calderas.

Cuando la calidad del bagazo es aceptable no se necesita de mucho oxígeno bajo el hogar, ya que al tener un bagazo no muy húmedo este se quema de mejor manera en el hogar y antes de llegar a la parrilla de la caldera, por lo cual se ve reducido el uso del ventilador forzado para oxigenar la parte inferior

del hogar, evitando la acumulación de combustible sin quemar; pero se debe incrementar el flujo de aire secundario e inducido. El aire secundario es necesario para la combustión del bagazo; se evitará que este se deposite sobre la parrilla. El inducido es el encargado de proporcionar una presión negativa en el hogar para lograr el desalojo de los gases de combustión.

Lo mismo sucede con una operación con carbón; este se puede mojar debido a las condiciones climáticas que, por lo general, en época de reparación, abarca los meses de mayo a noviembre, cuando hay mayor concentración de lluvia en la región. En la operación con carbón se utiliza el ventilador Detroit Stoker, cuya función es la de inyectar un flujo de aire hacia los alimentadores de carbón, que ayudan a la introducción del carbón al hogar de la caldera. Es importante controlar los parámetros de oxígeno en el hogar de la caldera y la calidad de combustible; esto es parte fundamental en la reducción de inquemados a la salida del evaporador.

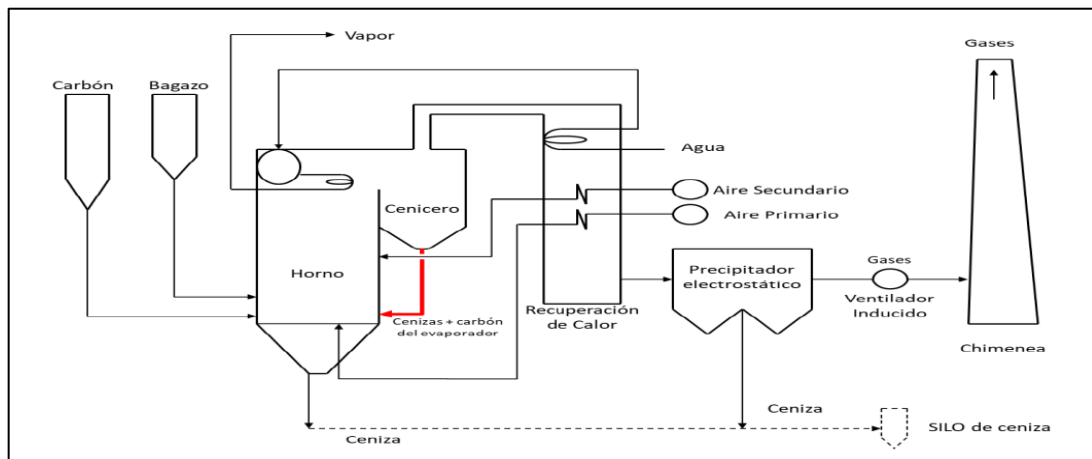
### **3.8. Incremento de ganancias por reducción de inquemados y recuperación de gastos de inversión**

El incremento de las ganancias se ve reflejado en la reducción del combustible utilizado diariamente en la caldera. Anualmente se tendría un ahorro en el costo de combustible de 85 642,7 USD. Esta cantidad se podría aprovechar para algún otro tipo de mantenimiento o mejora en la caldera. El costo del sistema sería de 113 000,00 USD el cual fue cotizado con *Detroit Stoker Company*, y consta de un sistema neumático de recuperación de ceniza volante para reinyectarse desde las tolvas del evaporador, de vuelta a la parte trasera de la caldera.

Cada línea de reinyección de cenizas consistirá en un conjunto de recogida de retorno de ceniza de acero fundido, tubería de cédula 80, diámetro de 4" (101,6 mm) y una boquilla de retorno de ceniza de acero fundido. Cada línea se basa en un recorrido recto y horizontal, desde el recogedor de retorno de ceniza hasta la boquilla de retorno. Se utiliza el mismo aire secundario para la inyección de los inquemados. La compañía proporcionará una transición de canal de entrada corta (aproximadamente 1,5 m de largo) desde la esquina inferior a la entrada del conjunto de recogida.

Requisitos del sistema: se requiere de un motor para el ventilador que retorne la ceniza, con 7 ½ HP, 3600 RPM, 220 V-440 V, con *dampers* para controlar el flujo de aire. El sistema necesitará de 650 pies<sup>3</sup>/min (1 103 m<sup>3</sup>/h), a 100 °F (38 °C), a 25 "w.g. (635 mm de H<sub>2</sub>O) en la entrada de las pastillas de retorno de ceniza.

Figura 20. **Recirculación de inquemados del evaporador**



Fuente: Centro de Investigaciones y Capacitación de la caña de azúcar. Ingenio Santa Ana.

Tabla XXVIII. **Flujo de efectivo**

<b>Año</b>	<b>Inversión</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Egresos</b>
<b>0</b>	\$ -113 000,00	-	-
<b>1</b>		\$ 85 642,70	\$ 13 333,33
<b>2</b>		\$ 85 642,70	\$ 13 333,33
<b>3</b>		\$ 85 642,70	\$ 13 333,33
<b>4</b>		\$ 85 642,70	\$ 13 333,33
<b>5</b>		\$ 85 642,70	\$ 13 333,33

Fuente: elaboración propia.

El valor presente neto (VPN) del flujo de efectivo da como resultado \$ 211 653,21; que al ser un valor positivo la inversión de un sistema de reinyección es menor que los ahorros de manera significativa; lo que se traduce en un proyecto rentable en el tiempo establecido.

## 4. FASE DE DOCENCIA

### 4.1. Capacitación al personal de operación y mantenimiento

La capacitación realizada con el personal se refirió al uso eficiente del combustible y aires de la caldera, manteniendo los parámetros de la misma según la calidad del combustible proporcionado por el ingenio.

Figura 21. Capacitación a operadores de calderas



Fuente: elaboración propia, instalaciones del ingenio Santa Ana. Área de Capacitación.

Se realizó también una serie de inducciones sobre la seguridad industrial en la planta, con el objetivo de reforzar las medidas que se tienen ya implementadas en el ingenio, y así evitar cualquier tipo de accidente en la operación por mínimo que este sea.

#### **4.2. Presentación de mejoras y avances**

Durante la realización del Ejercicio Profesional Supervisado se trabajó en equipo con los ingenieros supervisores del área de cogeneración del ingenio Santa Ana; se brindó información periódicamente respecto de los avances del proyecto a la gerencia del departamento y a la gerencia de la división industrial.

## CONCLUSIONES

1. Se logró identificar por medio de aforos y análisis realizados a las cenizas provenientes del sistema de extracción de gases de combustión de la caldera, la presencia de inquemados en las diferentes fases del circuito de gases, determinando en cuál fase existe mayor potencial de reinyección a la caldera.
2. La mayor presencia de inquemados se observó en el evaporador, mostrando porcentajes en las muestras del 44 % cuando se opera con bagazo, 83 % cuando se opera únicamente con carbón y 71 % cuando se utiliza mezcla de 70/30.
3. Las tolvas de captación de ceniza en el colector de polvos, precalentador y precipitador de aire muestran una baja presencia de inquemados, por lo cual se descartan para la reinyección a la caldera.
4. Se logró la reducción total de agua de pozo para la limpieza y acondicionamiento de la ceniza, con la instalación de una bomba para la reutilización de 220 galones por hora, que anteriormente eran desechados hacia las zanjas del ingenio.
5. Las condiciones del combustible suministrado a la caldera, dependiendo del transporte y almacenaje, afectan su combustión dentro de la caldera.
6. La operación y monitoreo de los ventiladores de la caldera son importantes en la reducción de inquemados; una buena combustión inicia con las

condiciones que el operador mantenga dentro del hogar, antes de introducir el combustible.

7. El ahorro de combustible proyectado debido a la reinyección de inquemados reducirá los costos para generar un megawatt de energía.



## RECOMENDACIONES

Al jefe de mantenimiento:

1. Realizar análisis de los minerales contenidos en la ceniza, ya que estos pueden provocar corrosión o deterioro de los materiales de las paredes del hogar en caso de reinyección.

Al operador de calderas:

2. Monitorear la operación del aire de alimentación de la caldera, con el fin de mantener un balance del oxígeno dentro del hogar óptimo, para la correcta combustión del carbón de alimentación.

A los supervisores de turno:

3. Monitorear el almacenaje y transporte del carbón y bagazo, evitando la humedad en el bagazo y un exceso de manipulación del carbón, por la formación de finos que son extraídos del hogar con el ventilador forzado, y el tiro inducido formado por la chimenea y los ventiladores inducidos.




## BIBLIOGRAFÍA

1. AXPUAX BÁMACA, Melvin Ezequiel. *Operación y mantenimiento de la torre de enfriamiento del Ingenio Santa Ana*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 95 p.
2. CENGEL, Yunes; BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, 2013. ISBN 978-0-07-352932-5. 956 p.
3. GONZÁLEZ, Jaime. *Informe de evaluación de inquemados. Informe inédito*. Guatemala: Valvexport, Inc., 2014. 61 p.
4. MUÑOZ, Mario. *Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor* Guatemala: Guatemala, 2015. 74 p.
5. The Badcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use*. Kitto, 41a ed. Ohio: McDermott, 2005. 1 200 p.




# ANEXO

## Anexo 1. Análisis próximo del carbón



**INCOLAB SERVICES COLOMBIA S.A.S.**  
COMMODITY SAMPLERS AND ANALYTICAL CHEMISTS



---

Office and Laboratory  
Torre del Caribe  
Cra. 21 No. 47-94  
Santa Marta, Magdalena  
Colombia

PSA: +57-5-4308020  
Tels: +57-5-4305457 / 4305485 /  
4305432  
E-mail: incolab@incolabcolombias.com

---

**CERTIFICATE OF SAMPLING AND ANALYSIS**

Date	: 29-Jun-17	
Our ref.	: 1706036-C	
Material	: Colombian Steam Coal in Bulk	
Vessel	: M/V Indigo Flora, B/L Date 26-Jun-17	
Shipper	: Trafigura Pte. Ltd.	
Consignee	: Compañía Agrícola Industrial Santa Ana S.A.	
Destination	: Puerto Quetzal, Guatemala	
Loading Port	: Carbosan, Colombia	
Weight	: 49,315,98 mt.	
Sampling Date	: From 24-Jun-17 To 26-Jun-17	

---

**SAMPLING**

We, the undersigned hereby certify that 100% of the cargo loaded onto M/V Indigo Flora, B/L Date 26-Jun-17 at Carbosan, Colombia, was mechanically sampled using a primary cutter in accordance with standard ASTM D2234/D2234M-16.

**PROXIMATE ANALYSIS**

	As Received Basis	Dry Basis	
Total Moisture - %	11.16		ASTM D3302-15
Ash - %	6.82	7.68	ASTM D3174-12
Volatile Matter - %	36.43	41.01	ASTM D3175-11
Gross Calorific Value - Btu/lb	11,561	13,013	ASTM D5885-13
Gross Calorific Value - Kcal/Kg	6,423	7,230	ASTM D5885-13
Total Sulfur - %	0.63	0.71	ASTM D4239-14(A)
Fixed Carbon - %	45.59	51.31	ASTM D3172-13


**MERCURY ANALYSIS**

	As Received Basis	Dry Basis	
Mercury - ppm	0.064	0.072	ASTM D6722-11


**SCREEN ANALYSIS PER ASTM D4749-12**

Retained 50 mm Round	: 2,0 %
Retained 6,3 mm Round, Passing 50 mm Round	: 58,3 %
Retained 1 mm Square, Passing 6,3 mm Round	: 26,0 %
Passing 1 mm Square	: 13,7 %
Total	: 100,0 %

Analysis performed in accordance with ASTM standards.



For and on behalf of,  
**INCOLAB SERVICES COLOMBIA S.A.S.**



Fuente: Incolab Services Colombia S.A.S. Análisis y muestreo Ingenio Santa Ana, p. 4.

