



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

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE
INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA**

Diego Israel Navarro Godínez

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE
INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DIEGO ISRAEL NAVARRO GODINEZ
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
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:

MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 7 de mayo de 2015.



Diego Israel Navarro Godinez



Guatemala, 30 de julio de 2015
REF.EPS.DOC.492.07.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Rodríguez Serrano.

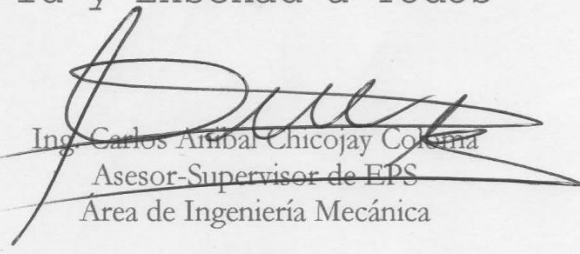
Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Diego Israel Navarro Godínez** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 201113936, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA.**

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. Carlos Anibal Chicojay Coloma
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica

c.c. Archivo
CACC/ra





Guatemala, 30 de julio de 2015
REF.EPS.D.369.07.15

Ing. Roberto Guzmán
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Guzmán:

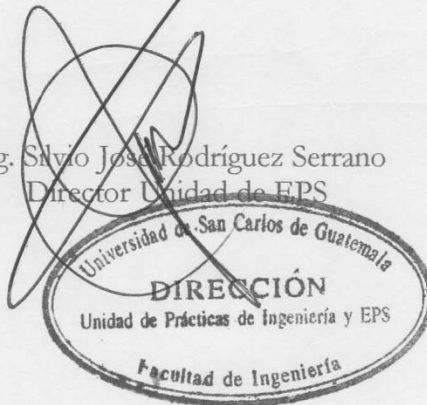
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Diego Israel Navarro Godínez** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Carlos Anibal Chicojay Coloma.

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. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS



SJRS/ra



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.269.2015

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: **MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA** del Estudiante **Diego Israel Navarro Godínez**, Carné No. **2011-13936** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, septiembre de 2015

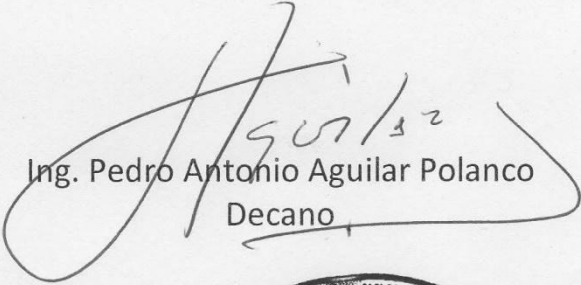
/aej



DTG. 482.2015

El Decano 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: **MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA REDUCCIÓN DE INQUEMADOS EN LA GENERADORA DE ELECTRICIDAD DUKE ENERGY, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Diego Israel Navarro Godínez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, septiembre de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi Creador y darme la sabiduría, capacidad y fuerzas para realizar todo lo mejor en mi vida.
- Mis padres** Israel Navarro y Liliam Godinez de Navarro, por haberme dado la vida, por sus consejos, palabras de ánimos y ser siempre apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.
- Mis abuelos** Por brindarme siempre su apoyo, sus sabios consejos, amor y ser un ejemplo de dedicación y esfuerzo.
- Mi hermana** Por su inspiración, cariño, paciencia y ser parte de mi felicidad.
- Mi familia** Mis tíos y primos, por haberme apoyado en todo momento, motivándome a seguir siempre adelante para alcanzar cada una de mis metas.
- Mis amigos** Por haberme apoyado en el transcurso de todos estos años que pasamos juntos en la Universidad. Amigos que siempre me dieron su apoyo y consejos para lograr juntos nuestras metas.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios superiores.
Facultad de Ingeniería	Por formarme como profesional y brindarme todo conocimiento adquirido.
Ing. Carlos Chicojay	Por brindarme su tiempo en la supervisión de este proyecto.
Ing. Ludin Recinos	Por la colaboración ofrecida. Gracias por su buen ejemplo profesional y ayuda para la realización de este trabajo.
Ing. Selvin Hernández	Por brindarme su amistad, colaboración y buen ejemplo profesional. Gracias por su apoyo para la culminación de este trabajo.
Planta Las Palmas II, Duke Energy, Guatemala	Por la cooperación recibida y por permitirme ser parte de esta organización.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. FASE DE INVESTIGACIÓN	
1.1. Información general de la empresa	1
1.1.1. Ubicación	2
1.1.2. Misión.....	2
1.1.3. Visión	2
1.1.4. Valores.....	3
1.1.5. Estructura organizacional de la empresa	3
1.2. Actividad industrial de la empresa	5
1.3. Principios termodinámicos	5
1.4. Generalidades de una planta generadora de vapor.....	19
1.4.1. Tipos de calderas.....	22
1.4.1.1. Piro tubulares.....	23
1.4.1.2. Acuotubulares	27
1.4.1.2.1. Por su tipo de tubos	27
1.4.1.2.2. Por su tipo de combustible..	31
1.4.2. Calderas de vapor y sus accesorios (acuotubular)	37
1.4.2.1. Horno u hogar	37
1.4.2.2. Molinos.....	39

1.4.2.3.	Ventiladores.....	39
1.4.2.3.1.	Ventilador de tiro forzado	39
1.4.2.3.2.	Ventiladores de tiro inducido	40
1.4.2.3.3.	<i>Over fire</i>	40
1.4.2.4.	Sopladores de hollín	40
1.4.2.5.	Separador de contaminantes.....	41
1.4.2.6.	Torres de enfriamiento.....	41
1.5.	Inquemados.....	44
1.5.1.	Sólidos.....	44
1.5.2.	Gaseosos	45

2. FASE TÉCNICO PROFESIONAL

2.1.	Descripción del sistema en el área de calderas de la planta Las Palmas II.....	47
2.2.	Tratamiento del carbón mineral.....	49
2.2.1.	Recepción y almacenamiento.....	49
2.2.2.	Su pulverización y mezcla con el aire primario	50
2.3.	Medición de gases e inquemados dentro de los quemadores.....	51
2.3.1.	Descripción de los equipos utilizados en el procedimiento de extracción de cenizas	53
2.3.1.1.	Sondas extractoras de ceniza y gases	53
2.3.1.2.	Equipo extractor de muestras de carbón	55
2.3.2.	Registro de emisión de gases y ceniza, evaluando el estado inicial de inquemados.....	58
2.3.3.	Diagnóstico de la situación	66
2.4.	Criterios de ingeniería en el diseño de los equipos para reducción de inquemados	68
2.4.1.	Eliminación de diamantes en tuberías de aire primario .	69

2.4.2.	Incorporación de anillos eliminadores de <i>roping</i> dentro de cada quemador	70
2.5.	Operación del aire primario y secundario en las calderas	72
2.6.	Programa de mantenimiento a equipos involucrados en el proceso de reducción de inquemados	74
2.6.1.	Conceptos de mantenimiento	74
2.6.2.	Tipos de mantenimiento.....	76
2.6.2.1.	Mantenimiento de averías.....	76
2.6.2.2.	Mantenimiento preventivo	77
2.6.2.3.	Mantenimiento predictivo	77
2.6.3.	Objetivos del programa de mantenimiento.....	77
2.7.	Incremento de ganancias por reducción de inquemados y recuperación de gastos de inversión	78
3.	FASE DE DOCENCIA	
3.1.	Detección de necesidades.....	81
3.1.1.	Proceso de detección de necesidades.....	82
3.1.2.	Entrevistas	83
3.1.3.	Observación.....	83
3.2.	Planificar reuniones	83
3.2.1.	Avance del control de inquemados	84
3.2.2.	Acciones correctivas	84
3.3.	Programación de capacitaciones.....	85
3.4.	Metodología de capacitación	85
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	APÉNDICES	93

ANEXOS.....95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama de la empresa	4
2.	Partes generales de una caldera pirotubular	26
3.	Diagrama de central térmica	43
4.	Puertos de medición de los quemadores	54
5.	Identificación de sondas instaladas	54
6.	Extractor de muestras de carbón.....	55
7.	Procedimiento extracción de cenizas	57
8.	Problemas en la extracción de muestras.....	58
9.	Dimensiones boquilla colectora de cenizas	63
10.	Gráfica correlación de inquemados para calibración de <i>air slides</i>	68
11.	Solución para la eliminación de diamantes en las tuberías	69
12.	Distribución uniforme de carbón.....	71
13.	Diseño de <i>antiroping</i>	72
14.	Elemento de <i>antiroping</i>	72
15.	Llama del quemador	73
16.	Análisis de velocidades aire/carbón dentro de cada quemador	74

TABLAS

I.	Lista de partes del extractor de muestras de carbón.....	56
II.	Mediciones de porcentaje de dióxido en malla.....	59
III.	Mediciones de monóxido de carbono en malla	60
IV.	Mediciones de porcentaje de inquemados en malla.....	61

V.	Peso muestras de cenizas en malla.....	62
VI.	Flujo de cenizas en malla.....	65
VII.	Medición promedio gases dióxido, monóxido de carbono e inquemados ..	66
VIII.	Metas logrables en reducción de inquemados	66
IX.	Distribución de aire/carbón en tuberías.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Calor
CST	Centistokes
O₂	Dióxido
U	Energía interna
H	Entalpia
°C	Grado Celsius
°F	Grado Fahrenheit
°K	Grado Kelvin
°R	Grado Rankine
gr	Gramo
Kcal	Kilocaloría
Kg	Kilogramo
Kv	Kilovoltio
Lb	Libra
psi	Libra por pulgada cuadrada
MJ	Megajoules
Mw	Megawatts
m²	Metros cuadrados
CO	Monóxido de carbono
P	Presión
SSF	Segundos Saybolt Furol
T	Temperatura
Ton	Tonelada

W

Trabajo

V

Volumen

GLOSARIO

Adiabático	Proceso en el cual el sistema termodinámico (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno.
Atemperador	Equipo para regular la temperatura del vapor sobrecalentado y/o recalentado, haciendo circular una parte del mismo a través de un serpentín sumergido en el agua de la caldera.
Caldera	Aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable en forma de calor, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.
Cuasiestático	Idealización de un proceso real que se lleva a cabo de tal modo que el sistema está en todo momento muy cerca del estado de equilibrio, como un proceso que se realiza en un número muy grande de pasos, o que lleva mucho tiempo.
Dámper	Válvula que retiene y regula el flujo de aire dentro de un ducto.
Eficacia	Capacidad de alcanzar el efecto que espera o se desea tras la realización de una acción.

Eficiencia	Capacidad de alcanzar las metas con la menor cantidad de recursos.
Entalpía	Medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.
Entropía	Magnitud física que permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.
Exergía	Propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno.
Factor de potencia	Cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo.
Hollín	Partículas sólidas de tamaño muy pequeño, en su mayoría compuestas de carbono impuro, pulverizado, y generalmente de colores oscuros resultantes de la combustión incompleta de un material. Su aspecto es similar a la ceniza, pero con un tono más negro.
Inquemados	Pérdidas que representan la energía calorífica no liberada como consecuencia de no haber logrado oxidar todo el carbono del combustible.

RESUMEN

Este trabajo fue realizado a través del programa EPS en la planta Las Palmas II, propiedad de Duke Energy, Guatemala, 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 de mejorar el proceso de combustión en cada una de las calderas de una generadora eléctrica.

Hace algún tiempo, la planta Las Palmas II tenía costos muy elevados por el consumo de combustible a través de los quemadores de las calderas. El problema a investigar consistió en los altos porcentajes de inquemados existentes en la ceniza como consecuencia de la falta de seguimiento a los sistemas de combustión de la planta. Parte fundamental del proyecto consiste en la investigación para recopilar información de las causas y las soluciones para la reducción del porcentaje de inquemados y evitar que se sigan generando.

La forma planteada para solucionarlo es la instalación de equipo especial en los quemadores de cada caldera, con el objetivo de conocer los datos reales de inquemados que existen, sus causas y las metas logrables que se pueden ejecutar, ya sea controlando y verificando periódicamente los sistemas de aire de las calderas o haciendo ciertas modificaciones en los equipos y máquinas de la planta.

OBJETIVOS

General

La reducción de inquemados en una generadora de vapor de alta presión que utiliza carbón mineral como combustible.

Específicos

1. Reducir los costos de combustible (carbón mineral) para la generación de calor dentro del generador de vapor.
2. Equilibrar la mezcla de aire/combustible que entra en cada uno de los quemadores de las calderas para mejorar la eficiencia del generador de vapor.
3. Conocer las consecuencias de tener excesivas velocidades en los aires primarios y lograr la reducción de las mismas.
4. Identificar las mejoras que se deben realizar en los equipos para cumplir con las necesidades del proceso.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tendencia de las empresas es optimizar los recursos utilizados en sus procesos para lograr con ello una mejora en los beneficios obtenidos y una reducción de consumos que se transforma en una disminución de costos.

La generadora de vapor de la planta Las Palmas II trabaja a base de carbón mineral como combustible para la generación de calor dentro de la caldera, se ha observado que existe un desperdicio de carbón durante el proceso de combustión, dado que este no se consume por completo y esto genera un aumento en los costos de la producción. El plan de reducción de inquemados dentro de la generadora de vapor para evitar el desperdicio de combustible tiene un alcance que abarca desde los ventiladores de aire primario y secundario, molinos, quemadores, gases de emisión en la chimenea.

En este trabajo de investigación se deben identificar las causas del problema y así dar lugar a las acciones correctivas para lograr la reducción de inquemados presentes en la ceniza. La información será recaudada directamente en los equipos, también apoyándose en los manuales de operación y mantenimiento de los equipos evaluados, personal operativo del cuarto de control de las máquinas, personal técnico y registros de auditorías. La investigación será desarrollada en cada equipo para identificar claramente las correcciones necesarias y acciones que se deben considerar en estos. También se tomarán en cuenta las normas de seguridad para la realización del proyecto, para evitar algún inconveniente.

1. FASE DE INVESTIGACIÓN

1.1. Información general de la empresa

Duke Energy es la empresa de servicios públicos de energía eléctrica más grande de los Estados Unidos. Es una compañía líder en generación y operaciones de energía eléctrica y distribución de gas en el continente americano. Con sede en Charlotte, Carolina del Norte, Estados Unidos, Duke Energy tiene el propósito de crear un valor superior y sostenible para sus clientes, empleados, inversionistas y comunidades en las que opera, a través de la producción, entrega y venta de productos y servicios de energía.

La actividad económica de la empresa se realiza teniendo en cuenta los factores sociales y medioambientales de las comunidades en las que se opera, con el fin de mantener la viabilidad de la compañía y del mundo en el largo plazo. Con más de 100 años de experiencia en el mercado, Duke Energy es de los líderes mundiales en el desarrollo y la operación de proyectos integrados de energía.

Duke Energy International (DEI) comenzó a invertir en América Latina en 1998; ahora posee, opera y administra plantas de generación de energía eléctrica en 7 países de América Central y América del Sur: Argentina, Chile, Brasil, Ecuador, El Salvador, Guatemala y Perú. La estrategia de DEI se concentra en optimizar el valor de sus activos en Latinoamérica y crecer a través de la inversión en generación de energía limpia en determinados países de la región.

Con 15 años de operar en Guatemala, Duke Energy es reconocida como una empresa eficiente, rentable y socialmente responsable. Desarrollando el negocio en nuestro país en 4 plantas distintas: planta Arizona, planta Laguna, planta Las Palmas I y planta Las Palmas II, con total respeto por el medio ambiente y por las comunidades vecinas.

1.1.1. Ubicación

La planta Las Palmas II de Duke Energy, Guatemala, lugar donde se realizó esta investigación, está ubicada en el kilómetro 61,5 de la antigua carretera al Puerto San José, Escuintla. Tiene una capacidad de generación de energía eléctrica de 83 MW.

1.1.2. Misión

“Somos una compañía internacional de energía que ofrece productos y servicios de alta calidad y resultados superiores para nuestros clientes, proveedores, empleados, comunidades y accionistas. Mantenemos nuestro alto desempeño a través del respeto a nuestros valores, el compromiso con la comunidad y el medio ambiente, el desarrollo de las competencias clave de nuestros empleados y el foco en su salud y seguridad” (Duke Energy, 2015).

1.1.3. Visión

“Seremos la compañía preferida de los actores que participan en los mercados de energía” (Duke Energy, 2015).

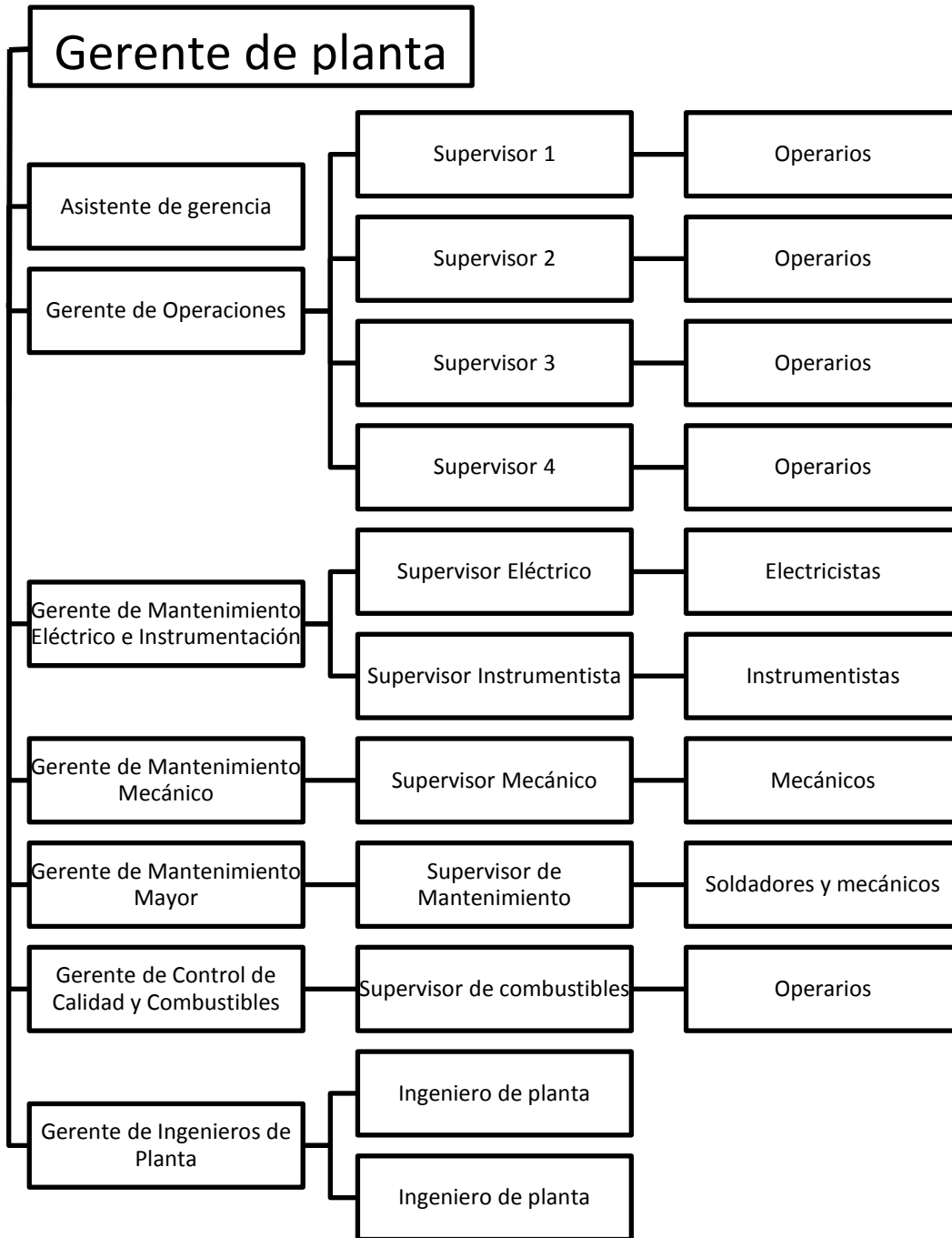
1.1.4. Valores

- “Seguridad: la seguridad de nuestros compañeros de trabajo y de todas las personas es nuestra prioridad más importante.
- Integridad: trabajamos siguiendo principios éticos y la confianza es el núcleo principal de nuestras relaciones.
- Responsabilidad: hacemos lo que decimos y respondemos por lo que hacemos.
- Respeto: nos respetamos unos a otros, escuchamos las opiniones de los demás y nos apoyamos en las fortalezas de cada uno.
- Comunicación: nos comunicamos en forma clara, abierta y periódica, y trabajamos enérgicamente para asegurar que nuestras voces sean escuchadas.
- Inclusión: respetamos y aprendemos de nuestras diferencias.
- Trabajo en equipo: trabajamos en forma eficiente como un solo equipo.”
(Duke Energy, 2015)

1.1.5. Estructura organizacional de la empresa

La estructura central de la empresa, Duke Energy Guatemala planta Las Palmas II, sigue una tendencia de jerarquía tradicional, todas las áreas son plenamente de prestación de servicios. A continuación se describe el organigrama de la empresa:

Figura 1. Organigrama de la empresa



Fuente: Gerencia planta Las Palmas II, Duke Energy, Guatemala.

1.2. Actividad industrial de la empresa

La generación de energía eléctrica es el objetivo principal de Duke Energy. Las especificaciones de este servicio es que la empresa cumpla con la cantidad de megawatts que se proyecte generar como meta. Para tal efecto, la planta Las Palmas II cuenta con 4 calderas acuotubulares, las cuales trabajan a base de carbón mineral como combustible. Se cuenta además con dos turbogeneradores:

- Turbos de escape: que se alimentan de vapor de la planta y devuelven vapor al proceso.
- Turbos de condensación: que se alimentan de vapor y sacan agua condensada.

Dicha generación se efectúa a 13,2 kV y a través de un transformador se eleva a 230 000 voltios para que sea entregada a la subestación correspondiente, se trabaja con un factor de potencia de 0,95. Cuando la planta trabaja a su máxima capacidad, teniendo las 4 calderas en funcionamiento, esta genera aproximadamente 83 MW de los cuales se venden 76 MW al mercado eléctrico nacional.

1.3. Principios termodinámicos

El calor (Q) es una forma de energía que se transfiere por una diferencia de temperatura o, cuando hay un vehículo, por una diferencia de presiones. Como es una forma de energía, no se puede crear ni destruir, aunque se le puede manejar y convertir en otras formas de energía y terminar por último como calor. La energía térmica o calorífica puede hacerse cambiar de lugar solo mediante la creación de una diferencia de niveles de energía, que se llama intensidad térmica o temperatura.

Termodinámicamente, el trabajo (W) es una interacción entre un sistema y sus alrededores, y lo desempeña el sistema si el único efecto externo a las fronteras podría consistir de la elevación de un peso. Esta es una definición operacional de trabajo, puesto que describe la manera de identificar y medir el trabajo desempeñado por un sistema. Existe un tipo importante de proceso que se conoce como proceso adiabático, que se define como cualquier proceso en el cual intervienen exclusivamente interacciones de trabajo. Una frontera adiabática, también llamada superficie de control adiabático, corresponde a una frontera que excluye toda interacción, excepto las que puedan clasificarse como efectos de trabajo. En un proceso adiabático no ocurre la transferencia de calor.

La Primera Ley de la Termodinámica establece que “la energía ni se puede crear ni destruir, solo se transforma de una forma a otra”. Esta ley ha producido una definición operacional de la energía. El cambio en la energía de un sistema cerrado es igual al trabajo hecho sobre o por el sistema en el curso de un proceso adiabático.

Existen muchas formas de trabajo y de energía. En primera instancia, una distinción útil consiste en separar las formas de trabajo y energía en dos clases, llamadas propiedades intrínsecas y extrínsecas. En términos generales, para cualquier sistema:

- Las propiedades extrínsecas (generales) consisten en las propiedades que todo cuerpo material posee como la masa, el volumen, el peso, la impenetrabilidad, la temperatura, etc.
- Las propiedades intrínsecas (específicas) maneja todo lo que son las propiedades peculiares que caracterizan a cada una de las sustancias, permitiendo diferenciarse de otras. Entre estas están: la densidad, el punto

de ebullición, la electronegatividad, la dureza, la tenacidad, la solubilidad, entre otras.

La transferencia de calor afecta solo al estado intrínseco de una sustancia. La energía total (E) puede presentarse tanto en forma de energía cinética (E_C), resultado del movimiento de un cuerpo, como en forma de energía potencial (E_P), resultado de la posición del cuerpo en relación con otros cuerpos.

Entonces:

$$E = E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}} \quad (\text{Ec. 1})$$

De acuerdo con la física clásica, puede demostrarse que es posible expresar la energía cinética total de un sistema de partículas mediante la suma de tres términos. Dos de dichos términos corresponden a las expresiones conocidas para energía cinética traslacional y rotacional, relativas a su centro de masa. Estas dos contribuciones son extrínsecas y medibles. El tercer término corresponde a la energía cinética de las partículas en el interior del sistema, relativa al centro de masa.

La energía potencial total de un sistema de partículas puede expresarse como la suma de cuatro cantidades independientes: energía potencial gravitacional, energías potencial electrostática y magneto estática. Estas tres formas de energía potencial son medibles y extrínsecas. La cuarta forma se debe a las fuerzas ejercidas sobre una partícula por el resultado de las partículas presentes en el sistema, sumadas para todas las partículas. Este tipo de energía potencial es intrínseca y no puede medirse directamente.

Cinco de las siete formas de energía cinética y potencial son extrínsecos y medibles. Los dos términos restantes representan las energías cinética y potencial de las partículas en el interior del sistema y no pueden medirse directamente. La suma de estos dos términos se define como energía interna U de la sustancia dentro del sistema. Es decir:

$$U = E_{cinética} + E_{potencial} \quad (\text{Ec. 2})$$

Otra forma útil de la ecuación es:

$$Q + W = U \quad (\text{Ec. 3})$$

En el cálculo de los balances de energía, además de la energía interna de una sustancia U , también es conveniente utilizar otra propiedad intrínseca llamada entalpía. La entalpía se define mediante la relación:

$$H = U + PV = U + W \quad (\text{Ec. 4})$$

En virtud de que U , P y V son propiedades, H también debe ser una propiedad. La entalpía es una cantidad de calor total en una libra de una sustancia calculada de acuerdo con la base aceptada de temperatura de 32 °F. La función entalpía no puede medirse directamente y debe relacionarse con algunas otras cantidades medibles.

Se puede definir la calidad de la energía en función de su potencial para desarrollar trabajo. La calidad de cada unidad de energía en un sistema A es mayor que la calidad de cada unidad de energía en el sistema B, si cada unidad de energía en el sistema A potencialmente puede efectuar más trabajo que cada unidad de energía en el sistema B. Aquella parte del contenido de energía

en un sistema dado, que potencialmente puede efectuar trabajo, recibe el nombre de trabajo disponible o energía disponible del sistema. Este trabajo disponible puede determinar que el sistema efectúe un cambio de estado cuasiestáticamente.

Dado que la entropía es una medida de la energía no disponible, cada vez que se genera, produce o crea entropía, se está creando energía no disponible (es decir, se destruye energía disponible).

El equilibrio de un sistema se caracteriza o define como:

- Un sistema se halla en equilibrio si un cambio adicional de estado no puede ocurrir, a menos que el sistema se someta a interacciones con sus alrededores.
- Un cambio finito del estado de un sistema en equilibrio necesita que en el estado de sus alrededores haya un cambio finito y permanente.

Todos los tipos de sistemas inicialmente en desequilibrio tenderán a alcanzar el equilibrio. No siendo posible hacer una demostración de este comportamiento que resulta ser general, es necesario postular su existencia. El enunciado siguiente es una de las formas de la Segunda Ley de la Termodinámica: “Todo sistema que tenga ciertas restricciones específicas y que tenga un límite para su volumen, puede alcanzar, partiendo de cualquier estado inicial, un estado de equilibrio estable sin que haya un efecto neto sobre los alrededores.”

Este enunciado postula la existencia de estados en equilibrio estable. Por restricciones se entienden aquellas barreras dentro o fuera del sistema que

restringen su comportamiento. Estas incluyen particiones internas, campos de fuerzas conservativos externos, paredes rígidas impermeables, entre otros. El término “límite superior para su volumen” significa que puede ser necesario algún tipo de recipiente rígido que rodee al sistema. El sistema real puede no ocupar todo el recipiente, pero nunca debe excederlo.

La Segunda Ley de la Termodinámica enuncia, básicamente, que el calor pasa solo en una dirección, que es de la mayor temperatura a la menor temperatura. Este paso se lleva a cabo mediante uno o más de los siguientes métodos básicos:

- **Conducción:** se define como el paso de calor entre las moléculas vecinas de una sustancia, o entre sustancias que se tocan y tienen un buen contacto entre sí y continúa hasta que hay un equilibrio de temperatura. La rapidez a la cual se conduce el calor a través de una sustancia depende de factores tales como:
 - El espesor del material
 - El área de su sección transversal
 - La diferencia de temperaturas entre los dos lados del material
 - La conductividad térmica (factor K) del material
 - La duración del flujo de calor

- **Convección:** transmisión de calor debido al movimiento del material mismo y se limita a los líquidos y a los gases. Cuando se calienta un material se establecen en su interior corrientes de convección y las partes más calientes suben, ya que el calor provoca la disminución de la densidad de los fluidos.

- Radiación: transmisión de calor mediante ondas electromagnéticas que viajan sin calentar el espacio o el aire intermedios. Cuando la energía radiante es absorbida por un material, se convierte en calor sensible. Todo cuerpo absorbe hasta cierto punto energía radiante, dependiendo de la diferencia de temperatura entre dicho cuerpo y los demás. Todo cuerpo irradia energía siempre que su temperatura sea mayor que la del cero absoluto, y que otro cuerpo cerca esté a una temperatura menor.

El enunciado de Kelvin y Planck de la Segunda Ley postula que ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia del 100 %: “Es imposible construir una máquina térmica cuyo único efecto sea el intercambio de calor con una sola fuente inicialmente en equilibrio y la producción de trabajo neto.”

Una máquina térmica hipotéticamente con una eficiencia del 100 % recibe una cantidad de calor Q de una fuente a una temperatura T y produce una cantidad equivalente de trabajo W . El motor térmico recorre un ciclo, por lo que su estado no cambia durante el proceso. La fuente de energía calorífica comienza en un estado de equilibrio y se dirige luego hacia otro estado de equilibrio (debido a su pérdida de energía), mientras que el único efecto sobre los alrededores es la producción de trabajo. El trabajo que se produce se puede utilizar para alterar aún más el estado de la fuente calorífica.

Termodinámicamente, los procesos pueden ser reversibles, irreversibles e imposibles. En general, un proceso reversible es un proceso que comienza en un estado inicial de equilibrio si en cualquier instante durante el proceso, tanto el sistema como el ambiente con el que interactúa, pueden regresar a sus estados iniciales. El concepto de reversibilidad se puede aplicar tanto a los sistemas cerrados como abiertos. El proceso reversible es una idealización. Existen dos razones fundamentales por las cuales un proceso real nunca puede

ser totalmente reversible. En primer lugar, se necesita la ausencia de fricción sólida en las superficies de contacto. En segundo lugar, la exigencia de que un proceso sea cuasiestático, con el objeto de que sea reversible.

En un proceso irreversible ya sea el sistema o sus alrededores no se pueden regresar a sus estados iniciales. Todo sistema que regrese a su estado inicial después de experimentar un proceso irreversible dejará en los alrededores una historia debido a las irreversibilidades. Estas últimas surgen de dos fuentes:

- La presencia de efectos disipativos inherentes
- La presencia de un proceso que no es cuasiestático

La presencia de cualquiera de las dos clases de efecto es suficiente para que un proceso sea irreversible. Como todo proceso real incluye estos efectos, el proceso reversible es un caso límite al que puede acercarse el funcionamiento de todo proceso real, pero nunca igualar en la práctica. A pesar de todo, un proceso reversible es un punto de arranque adecuado en el cual se basan los cálculos termodinámicos.

Un proceso solo puede tener un cambio neto igual a cero en su entropía (reversible) o un incremento en la misma (irreversible) pero jamás podrá existir una reducción del valor de cambio entrópico (imposible).

Las máquinas térmicas pueden clasificarse como totalmente reversibles o irreversibles. Una máquina térmica totalmente reversible está libre de efectos disipativos y de desequilibrio durante su operación. Estos efectos deben estar ausentes no solo dentro de la máquina, sino también respecto de la

transferencia de calor que se lleva a cabo, por lo menos con una fuente térmica y un sumidero de calor.

- La eficiencia de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia térmica de una máquina totalmente reversible que funciona entre los mismos dos depósitos de calor.
- Las eficiencias térmicas de dos máquinas térmicas totalmente reversibles que funcionan entre los mismos dos depósitos de calor son iguales.

El principio de Carnot permite determinar una expresión general para la máxima eficiencia térmica teórica de cualquier máquina térmica. Como todas las máquinas térmicas totalmente reversibles tienen la misma eficiencia, si funcionan entre los mismos dos depósitos térmicos, la construcción y la forma de operar de la máquina no afecta su eficiencia térmica. Por tanto, los únicos parámetros que determinan la máxima eficiencia térmica teórica son las temperaturas de los depósitos de calor. Consecuentemente, con base en el principio de Carnot, se puede escribir:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_B}{T_A} \quad (\text{Ec. 5})$$

La eficiencia térmica dada por la ecuación anterior se llama eficiencia de Carnot. Según el principio de Carnot, esta es la máxima eficiencia que cualquier máquina térmica puede tener al funcionar entre depósitos térmicos con temperaturas T_A y T_B . Para lograr altas eficiencias térmicas en las máquinas reales, la segunda ley indica que T_A deberá ser tan alto como se pueda, y que las irreversibles deberán mantenerse en sus valores prácticos más bajos.

La eficiencia térmica de un ciclo de potencia se maximiza si todo el calor suministrado por una fuente de energía, ocurre a la máxima temperatura posible

(producido por una caldera), y si toda energía expulsada a un sumidero ocurre a la mínima temperatura posible (condensador).

El ciclo de Carnot resulta poco práctico en aplicaciones reales, pero sirve como punto de partida para un ciclo más próximo a la situación real llamado ciclo Rankine. Un ciclo de potencia de vapor de Rankine simple consiste en:

- Compresión isentrópica en una bomba
- Adición de calor a presión constante en una caldera
- Expansión isentrópica en una turbina
- Extracción de calor a presión constante en un condensador

La eficiencia del ciclo se define como:

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{Neto}}{Q_{Entrada}} \quad (\text{Ec. 6})$$

La eficiencia del ciclo de Rankine simple se puede aumentar, con base en el ciclo teórico de Carnot, ya sea disminuyendo la temperatura a la cual se expulsa el calor o bien aumentando la temperatura promedio a la cual se suministra el calor. El primer efecto se lleva a cabo disminuyendo la presión del condensador, lo que a su vez hace que disminuya el valor de la temperatura a la salida del condensador. Sin embargo, hay un límite para una presión mínima en el condensador.

Generalmente esta presión es la atmosférica aunque puede llegarse a pequeños intervalos de vacío. Aun cuando el efecto de disminuir la presión de condensación es ventajoso porque hace que aumente la eficiencia térmica, tiene la gran desventaja de hacer que aumente el contenido de humedad (disminuyendo la calidad) del fluido que abandona la turbina.

Este mayor contenido de humedad en la turbina hace que decrezca la eficiencia de una turbina real. Además, el impacto de las gotas de líquido sobre los álabes de la turbina puede generar un grave problema de erosión.

Hay que considerar que, al aumentar la temperatura promedio de la cual se suministra el calor, aumentará la eficiencia del ciclo de Rankine. El aumento de la eficiencia del ciclo mediante la elevación de la temperatura del fluido que entra en la turbina y la eliminación del problema de la humedad en la turbina se pueden lograr de manera simultánea mediante la adición de un sobrecalentador al ciclo de Rankine simple.

El proceso de sobrecalentamiento lleva a una temperatura mayor el vapor a la entrada de la turbina sin que aumente la presión máxima del ciclo. Después de que el vapor saturado abandona la caldera, el fluido pasa a través de otra sección de entrada de calor, en donde la temperatura aumenta, teóricamente, a presión constante. El vapor sale del sobrecalentador a una temperatura restringida solo por efectos de carácter metalúrgico.

Se puede lograr un aumento equivalente en la temperatura promedio durante el proceso de entrada de calor elevando la presión máxima del ciclo, es decir, la presión de la caldera. Como consecuencia existe también un aumento de presión del condensador, dado por el resultado de una disminución en la calidad del vapor que sale de la turbina.

Para evitar el problema de la erosión sin perder la ventaja de las mayores temperaturas logradas mediante el incremento de la presión en la caldera, se ha desarrollado el ciclo de recalentamiento. En el ciclo de recalentamiento no se permite que el vapor se expanda completamente hasta la presión del condensador en una sola etapa. Después de una expansión parcial el vapor se

extrae de la turbina y se recalienta a presión constante. Luego se regresa a la turbina para expandirlo más hasta la presión del condensador.

Puede considerarse que la turbina consiste en dos etapas, una de alta presión y otra de baja presión. Debido a que la temperatura promedio del proceso de recalentamiento puede resultar menor que la temperatura promedio de adición de calor, el diseño de un sistema recalentado no necesariamente hace que aumente la eficiencia térmica del ciclo de Rankine básico.

El ciclo de Rankine simple con sobrecalentamiento muestra una grave desventaja respecto del ciclo básico. Para la parte de adición de calor, la temperatura promedio es muy inferior a la temperatura de los procesos de vaporización y de sobrecalentamiento. Desde el punto de vista de la segunda ley, la eficiencia del ciclo se reduce considerablemente en virtud de este proceso de adición de calor, siendo la eficiencia del ciclo simple más cercana a la eficiencia del ciclo de Carnot. Un método práctico para superar ésta desventaja es mediante el uso de un proceso de regeneración, interno al ciclo total.

El ciclo de potencia de vapor con regeneración ideal se lleva a cabo mediante una extracción inicial del vapor que entra en la turbina, dirigiéndolo hacia un intercambiador de calor conocido como calentador de agua de alimentación. La parte de vapor que no se extrae se expande completamente hasta la presión del condensador y luego se condensa para formar líquido saturado.

Una bomba hace que la presión del líquido que sale del condensador aumente isentrópicamente hasta la misma presión que la del vapor extraído. El líquido comprimido entra luego en el calentador de agua de alimentación, donde

recibe calor de la corriente de vapor extraída de la turbina. En la situación ideal, los gastos másicos de las dos corrientes que entran en el calentador se ajustan para que el estado de la mezcla que sale del calentador sea un líquido saturado a la presión del calentador. Finalmente, una segunda bomba eleva isentrópicamente la presión del líquido hasta la presión del generador de vapor.

Los ciclos anteriores no consideran ningún tipo de irreversibilidad. En ciclos reales existen pérdidas por fricción en las tuberías, lo cual da por resultado caídas de presión. En todo equipo hay pérdidas por transferencia de calor. Las irreversibilidades causadas por el flujo del fluido son de importancia particular en la turbina y en las bombas. Si las pérdidas de calor son despreciables en una turbina o en una bomba, entonces es necesario considerar la eficiencia adiabática de estos equipos, para que el análisis ideal se ajuste más al funcionamiento real.

El primer principio de la termodinámica dice que la energía se conserva en cualquier proceso y que no se puede crear ni destruir; la energía que acompaña a un combustible, o a los flujos de materia se puede localizar y determinar en los productos resultantes, pero el principio de conservación de la energía no aclara otros aspectos relativos a la utilización de los recursos energéticos. Si se supone que un combustible se quema, el estado final viene determinado por una mezcla de gases procedentes de la combustión: cenizas, aire residual y calor.

La energía asociada al sistema permanece constante, pero la mezcla inicial de combustible y aire es mucho más útil y tiene más calidad que la mezcla final de gases calientes, es decir, el combustible siempre se podría utilizar en cualquier dispositivo para generar un trabajo, mientras que los posibles usos de los productos de la combustión serían más restringidos, por lo

que la energía útil del sistema al principio del proceso es mucho mayor que la energía útil que tienen los gases al final de la combustión, que se destruye a causa de la naturaleza irreversible del proceso, por lo que la energía útil así definida no se conserva, al contrario que la energía.

Los fundamentos del concepto de exergía aparecen con el segundo principio de la termodinámica y las leyes del equilibrio de las transformaciones reales, al existir la posibilidad de poder generar un trabajo cuando dos sistemas en distintos estados térmicos, se ponen en contacto. Si uno de ellos es un sistema ideal (ambiente) y el otro es un sistema cerrado, la exergía es el trabajo teórico máximo que se puede obtener de su mutua interacción hasta alcanzar el estado de equilibrio, dependiendo del valor numérico de la misma de los estados del sistema cerrado considerado y del ambiente.

La exergía se puede destruir a causa de las irreversibilidades y también se puede transferir hacia o desde un sistema; el uso eficiente de los recursos energéticos va asociado a la destrucción y pérdida de exergía en los sistemas, siendo el objetivo del análisis exergético localizar, cuantificar e identificar estas causas. La exergía es, por lo tanto, el trabajo teórico máximo que se puede obtener cuando el sistema cerrado evoluciona desde un estado inicial dado hasta su estado muerto, interaccionando solo con el ambiente.

La exergía puede ser definida también como el trabajo teórico mínimo necesario a aportar para conseguir que el sistema cerrado pase desde su estado muerto hasta otro estado prefijado, no pudiendo ser negativa. La exergía es, por lo tanto, una medida de la diferencia entre el estado de un sistema cerrado y el estado del ambiente.

La eficiencia exergética permite distinguir los métodos de utilización de los recursos energéticos que son termodinámicamente efectivos de aquellos que no lo son, o lo son en menor grado; se puede emplear para determinar la efectividad de posibles proyectos técnicos destinados a mejorar las prestaciones de sistemas térmicos, comparando los valores de la eficiencia antes y después de que la modificación propuesta se lleve a cabo para ver el grado de mejora obtenido.

El límite del 100 % para la eficacia exergética no es un objetivo práctico, ya que implicaría que no hubiese destrucción de exergía, lo cual supondría tiempos operativos muy largos o dispositivos con superficies de intercambios térmicos muy grandes y complicados, factores incompatibles, con una operación económica rentable, fundamental a la hora de resolver un proyecto.

1.4. Generalidades de una planta generadora de vapor

El término de generador de vapor está siendo utilizado en la actualidad para reemplazar la denominación de caldera, e indica al conjunto de equipos compuestos por: horno (u hogar), cámaras de agua (o evaporador), quemadores, sobrecalentadores, recalentadores, economizador y precalentador de aire. Las calderas son dispositivos de ingeniería diseñados para generar vapor saturado (vapor a punto de condensarse) debido a una transferencia de calor, proveniente de la transformación de la energía química del combustible mediante la combustión, en energía utilizable (calor), y transferirla al fluido de trabajo (agua en estado líquido), el cual la absorbe y cambia de fase (se convierte en vapor).

El término de caldera ha sido por mucho tiempo utilizado y los dos términos se usan indistintamente. Es común la confusión entre los términos de

caldera y generador de vapor, pero la diferencia es que el segundo produce vapor sobrecalentado (vapor seco) y el otro vapor saturado (vapor húmedo). La producción de vapor a partir de la combustión de combustibles fósiles se utiliza en todo tipo de industrias de transformación de materias primas y en las centrales termoeléctricas.

La caldera es un dispositivo en el que se hace hervir agua para producir vapor. El calor necesario para calentar y vaporizar el agua puede ser suministrado por un hogar, por gases calientes recuperados a la salida de otro aparato industrial (horno, por ejemplo), por el fluido refrigerador de una pila atómica, por irradiación solar o por una corriente eléctrica. Cuando el calor es suministrado por un líquido caliente o por vapor que se condensa, se suelen emplear otras denominaciones, tales como vaporizador y transformador de vapor.

Los aparatos que quitan su vapor al fluido refrigerador de un reactor nuclear (pila atómica), si bien constituyen verdaderos evaporadores o calderas en sentido amplio de la palabra, se denominan normalmente intercambiadores de calor. Durante su funcionamiento, la caldera propiamente dicha está sometida interiormente a la presión de equilibrio del agua y de su vapor a la temperatura alcanzada. Los otros elementos del grupo recorridos por el agua o el vapor, a partir de la bomba de alimentación (economizador, recalentador), están sometidos casi a la misma presión, pero la temperatura del fluido puede ser inferior o superior a la ebullición.

La forma de las calderas de vapor ha evolucionado considerablemente y, sobre todo, se ha diversificado, incluso si solo se consideran las calderas calentadas por hogares. Las primeras calderas consistían esencialmente en recipientes cerrados, cuya parte inferior, llena de agua, estaba sometida a la

irradiación de un hogar o al contacto de gases calientes. Para obtener, además, grandes superficies de contacto, se construyeron más adelante calderas con hervidores situados debajo del cuerpo cilíndrico principal y conectados a este mediante conductos tubulares. En este sentido ha constituido una nueva etapa, la aparición de las calderas semitubulares, cuyo cuerpo principal está atravesado por un haz tubular.

Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa; generalmente si la combustión de algún combustible de un fluido no es agua ni vapor, a la unidad se le clasifica como un vaporizador o como un calentador de líquidos térmicos. Antes de pasar a la clasificación de las calderas, se mencionarán los elementos y dispositivos que son comunes a todos los tipos. Entre ellos figuran, ante todo, la superficie de caldeo o de calefacción, que es aquella zona de las paredes de la caldera que están sometidas directamente a la acción de los gases calientes. Esta superficie de caldeo se mide por la cara de las planchas en contacto con los gases calientes y se expresará en metros cuadrados.

Según, si en la otra cara se encuentra agua o vapor, se dice que la superficie está en contacto con agua o con vapor, debiendo tenerse en cuenta únicamente el valor de la primera, mientras que la superficie de calefacción en contacto con vapor solo debe admitirse cuando los gases calientes encuentren, antes de llegar a ella, una superficie de caldeo en contacto con agua, que sea por lo menos, igual a veinte veces más que la parrilla.

Se llama intensidad de vaporización a la cantidad de vapor en kilogramos que produce un metro cuadrado de superficie en una hora, o sea la cantidad de agua en kilogramos que se vaporiza por hora y por metro cuadrado.

El calor necesario para ello ha de atravesar la pared de la caldera, donde encontrará diversos obstáculos, cuyas principales causas son las siguientes:

- Resistencia a la transmisión entre los gases calientes y la pared de la caldera
- Resistencia a la conducción a través de la pared metálica
- Resistencia a la transmisión entre la pared y el agua

La resistencia a la conducción es pequeña y constante y está representada por el hierro, que es el material más empleado, por 1.5º a 2º de diferencia de temperatura para cada centímetro de espesor de chapa. Las resistencias a la transmisión son más importantes y variables; por el lado de los gases son mayores que por el lado del agua y dependiendo, en ambos, del estado de la superficie, que tiende a cubrirse constantemente de hollín y cenizas por parte de los gases y de los lodos e incrustaciones por la del agua.

Es importante hacer mención que se ha visto que la transmisión de calor es tanto más activa, cuanto mayor sea la velocidad con que circula el agua en contacto con la superficie de caldeo.

1.4.1. Tipos de calderas

Las calderas constan de superficies a través de las cuales se transmite el calor y están diseñadas para circulación y separación de agua y vapor. Generalmente se clasifican en calderas de tubos de humo (pirotubulares) y calderas de tubos de agua (acuotubulares).

1.4.1.1. Pirotubulares

En estas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales están rodeados de agua. Generalmente tienen un hogar integral, llamado caja de fuego, limitado por superficies enfriadas por agua. La caldera pirotubular fija con tubos de retorno horizontales (HRT) es una combinación de parrilla, altar refractario, puertas de carga, cenicero y cámara de combustión.

Las superficies interiores de las paredes del hogar están revestidas de refractario. Los gases calientes pasan por encima del altar y lamen todo el fondo de la caldera, volviendo a la parte frontal de esta por el interior de los tubos. Finalmente los productos de la combustión pasan a la chimenea.

Estas calderas con tubos de retorno se utilizan en pequeñas centrales industriales debido a sus pequeñas capacidades de producción de vapor, presiones limitadas y baja velocidad de producción de vapor. La caldera de vapor pirotubular está concebida especialmente para aprovechamiento de gases de recuperación, y presenta las siguientes características: el cuerpo de caldera está formado por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor. La circulación de gases se realiza desde una cámara frontal dotada de brida de adaptación, hasta la zona posterior donde termina su recorrido en otra cámara de salida de humos.

El acceso al cuerpo, se realiza mediante puertas atornilladas y abisagradas en la cámara frontal y posterior de entrada y salida de gases, equipadas con bridas de conexión. Existe otro acceso, el cual se efectúa a través de la boca de hombre, situada en la bisectriz superior del cuerpo y con

tubuladuras de gran diámetro en la bisectriz inferior y placa posterior para facilitar la limpieza de posible acumulación de lodos.

El conjunto completo, calorífugado y con sus accesorios, se asienta sobre un soporte deslizante y bancada de sólida y firme construcción, suministrándose como unidad compacta y dispuesta a entrar en funcionamiento tras realizar las conexiones a instalación. La caldera, una vez realizadas las pruebas y comprobaciones reglamentarias y legales por una entidad colaboradora de la administración, se entrega adjuntando un "Expediente de control de calidad" que contiene todos los certificados y resultados obtenidos.

De acuerdo con su construcción, las calderas se clasifican de la siguiente manera:

- De hogar externo:
 - Horizontales tubulares de retorno
 - De hogar de caja corta
 - Caldera de tipo compacto

- De hogar interno:
 - Horizontales tubulares:
 - Locomóviles o de locomotora
 - De hogar corto
 - Caldera tipo compacto
 - Caldera de tipo escocés:
 - ✓ De cabezal posterior seco (cabezal posterior con revestimiento refractario).
 - ✓ De cabezal posterior de agua (tipo escocés marino).
 - ✓ De cubierta (o cielo) de agua.

- Calderas escocesas tipo paquete:
 - ✓ De cabezal posterior seco, de cabezal posterior de agua y de tapa de agua.
 - ✓ De dos, tres y cuatro pasos.
- Calderas verticales tubulares:
 - Caldera de fuerza, portátil, de cabezal plano o sumergido:
 - ✓ De domo recto
 - ✓ Caldera de caja de humo cónica

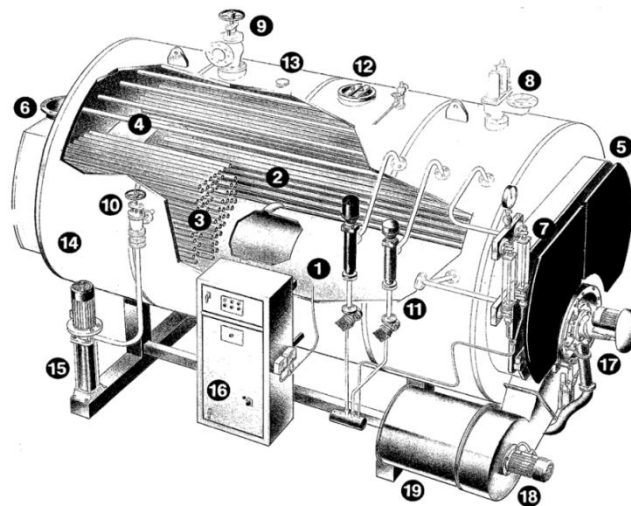
La caldera original de recipiente cilíndrico (tipo marmita) fue inicialmente mejorada, mediante el paso de los gases calientes por dentro de los tubos colocados en el interior del cuerpo cilíndrico de las calderas. La caldera de tubos de humo (pirotubulares) se usa generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente pequeña. No se utiliza para el accionamiento de turbinas, porque no es conveniente adaptarlas a la instalación de supercalentadores.

La caldera de tubos de humo tiene alimentación en cuanto a su tamaño y en la adaptabilidad de su diseño. Tiene sin embargo la ventaja de su gran volumen de almacenamiento de agua, además de su peculiaridad de compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones en la demanda de vapor. Debido a su gran volumen de agua, el tiempo que necesita para alcanzar su presión de trabajo partiendo de un arranque en frío, es considerablemente menor que el requerido para una caldera acuotubular. Su posibilidad de recalentamiento es limitada y depende del tipo de caldera. Con el aumento de la demanda de vapor, la temperatura de los gases se incrementa rápidamente.

Las calderas pirotubulares pueden ser diseñadas para que el recorrido de los gases de la combustión dentro de estas sea de uno, dos, tres o cuatro pasos.

Las partes generales de una caldera pirotubular se presentan en la siguiente figura:

Figura 2. **Partes generales de una caldera pirotubular**



- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1. Hogar | 11. Controles de nivel |
| 2. Tubos (2do. paso) | 12. Entrada de hombre |
| 3. Tubos (3er. paso) | 13. Conexión de repuesto |
| 4. Cámara de combustión | 14. Carcaza |
| 5. Caja de humos frontal | 15. Bomba agua |
| 6. Caja de salida posterior | 16. Panel de control |
| 7. Visor | 17. Quemador |
| 8. Válvula de seguridad | 18. Ventilador |
| 9. Válvula de salida de vapor | 19. Silenciador ventilador |
| 10. Válvula de retención de agua | |

Fuente: Metalurgia. <https://metalurgiaunmsm.wordpress.com/calderas/> Consulta: abril de 2015.

1.4.1.2. Acuotubulares

En las calderas acuotubulares el agua y el vapor fluyen por el interior de los tubos y los gases calientes se dirigen mediante deflectores, a través del exterior de los tubos. Pueden clasificarse en calderas de tubos rectos y calderas de tubos curvos; es el doblado tal para que los tubos entren radialmente en el tambor (domo). Estas calderas pueden proyectarse para quemar cualquier clase de combustibles, carbón en diversos tipos de parrillas, aceites, gas y bagazo.

Para la separación del vapor se utilizan los domos superior e inferior (domo de lodos); sirve para distribuir el agua a los cabezales inferiores que forman las paredes de la caldera. En el domo inferior se acumulan los depósitos formados por la evaporación del agua, los cuales son retirados mediante purgas discontinuas.

El domo superior está equipado con deflectores para desviar al sistema de recirculación del agua fría que entra y con separadores centrífugos para separar el agua del vapor.

1.4.1.2.1. Por su tipo de tubos

Las calderas acuotubulares se clasifican de la siguiente manera:

- Caldera horizontal de tubos rectos
 - De cabezal de caja o cabezal seccional
 - De domo longitudinal o transversal (cruzado)
 - De tipo paquete, con hogar de caja

- De tubos curvados
 - De cuatro domos
 - De tres domos
 - De cabezal bajo y tres domos
 - De dos domos, de tubos oblicuos
 - De tres domos en forma de “A”
 - De tubos cortos y tubos largos, de dos domos
 - De dos domos en forma de “O”

Las calderas pirotubulares son insuficientes en cuanto se presentan las necesidades de flujo y presión de vapor. Los diámetros grandes de los cuerpos requieren placas más gruesas para soportar los esfuerzos a los que son sometidos por la presión y la temperatura. Los diferenciales de las temperaturas ocasionan grandes tensiones, de magnitud indeterminable. Estas tensiones, en combinación con los efectos de la incrustación y otros sedimentos, han dado lugar a muchas explosiones de calderas. Debido a las menores dimensiones de sus elementos componentes, y su facilidad de contrarrestar los efectos de la expansión, la caldera acuotubular es más conveniente para las grandes capacidades y mayores presiones dentro de la correlativa seguridad de su diseño.

La caldera acuotubular se compone de tubos y domos; los tubos, que sirven para interconectar los domos quedan localizados invariablemente en la parte exterior con relación a estos. Los domos tienen la misión de almacenar agua y vapor ya que no necesitan tener ninguna superficie tubular de calefacción; pueden fabricarse en diámetros menores que los cilindros de las calderas pirotubulares, por consiguiente pueden construirse para soportar presiones más altas. La superficie de calefacción queda circunscrita exclusivamente a los tubos.

Estas calderas tienen circulación natural de agua, porque el agua de alimentación, precalentada en los calentadores y presurizada por las bombas, entra al domo de agua – vapor, se mezcla con agua saturada del vapor y se descarga al domo de agua por los tubos posteriores. Como los tubos frontales de la caldera se encuentran en contacto con los gases de combustión a mayor temperatura que los tubos posteriores, el agua tiende a fluir hacia el domo superior, es de esta manera como se produce la circulación natural por diferencia de densidades, con excepción forzada.

Cuando se habla de calderas supercríticas la circulación es forzada, porque llega un momento que la densidad del agua no cambia en la caldera, normalmente en la caldera convencional, el agua fría entra en el domo superior y baja al interior porque su densidad es mayor; a medida que se calienta vuelve por medio de otros tubos al domo superior, dándose así la circulación natural.

La caldera acuotubular puede ser del tipo de tubos rectos o curvos. Los diferentes modelos de calderas de tubos curvados tienen mejores características de presión y temperatura, han ido desplazando gradualmente a la caldera de tubos rectos en los servicios de alto rendimiento, de manera que en la actualidad este tipo de caldera se ha generalizado en la industria productora de fuerza.

La caldera de tubos curvados ofrece frente a los tubos rectos, muchas ventajas, entre las que se destacan las siguientes:

- Mayor economía en su fabricación y operación, debido al uso de soldadura, aceros mejorados, construcción de paredes de agua y nuevas técnicas de fabricación.
- Mejor acceso para inspección, limpieza y servicios de mantenimiento.

- Trabaja con mayor capacidad de evaporación y entrega de vapor más seco.

Los elementos primordiales de que se compone la caldera acuotubular con tubos curvados, están formados esencialmente por domos (o domos y cabezales), interconectados por medio de tubos curvados. Está dotada de un horno refrigerado por el agua que circula por dentro de los tubos que conforman las paredes.

En las unidades modernas de tubos curvados la capacidad se mantiene en una proporción menor de 29 756 Kg. de vapor por hora, por metro de ancho de caldera (20 000 lb / HR.) y por pie de ancho de caldera, considerando exclusivamente la superficie que absorbe el calor radiante.

Las calderas pequeñas de tubos de agua curvados han sido bastante bien estandarizadas, reduciéndolas a un número relativamente escaso de tipos. Las calderas más populares son de dos y tres domos, de altura reducida, las inclinadas de dos domos, las del tipo "O", de dos domos y de las de tres domos del tipo "A", así como las de diferentes construcciones tipo paquete.

Las calderas de tubos curvados presentan una gran flexibilidad en el diseño, sobre todo en relación con la disposición del domo, ya que los tubos se insertan radialmente a este. El tubo curvado permite también la libre expansión y contracción. Las unidades de gran capacidad con supercalentadores de superficie extremadamente grandes, suelen tener una sección pequeña de superficies de convección que protege al supercalentador de las altas temperaturas, producidas por la combustión de los combustibles en el hogar en la caldera.

Los domos de las calderas acuotubulares están protegidos contra el calor radiante de la combustión, y se diseñan de tal manera, que los sedimentos se depositen fuera de la zona de circulación rápida. El aumento de la capacidad de la caldera es obtenible, sin aumentar los diámetros de los domos; la falla en uno de los tubos no necesita forzosamente causar una explosión seria. La caldera de tubos curvados es un vaporizador rápido; su reacción a las fluctuaciones de la carga es rápida por su volumen relativamente reducido.

En comparación con su capacidad generadora de vapor. Esta flexibilidad en la evaporación es sostenida sin llegar a un esfuerzo excesivo. La caldera acuotubular de tubos curvados se puede adaptar para su operación con aceites combustibles, gas, carbón, leña o bagazo.

1.4.1.2.2. Por su tipo de combustible

Se denomina combustible a todos aquellos cuerpos que tengan grandes proporciones de carbono e hidrógeno y que por consiguiente, al ponerse con el oxígeno del aire, producen o generan calor, en general las calderas se pueden clasificar por el tipo de combustibles que utilizan para generar vapor en tres grupos que son: sólidos, líquido, gaseosos.

- Sólido: existen varios tipos de combustibles sólidos como el carbón, leña, bagazo de caña, cascarilla de arroz, cascarilla de palma africana y aserrín. En la planta Las Palmas II se utiliza carbón mineral como combustible para generar vapor. El carbón contiene hidrocarburos volátiles, azufre y nitrógeno, así como cenizas y otros elementos en menor cantidad (potasio, calcio, sodio, magnesio, entre otros). El carbón de origen mineral se clasifica según su contenido de carbono, por el grado de transformación que han experimentado en su proceso y por el uso al que

se adaptan. La escala más recomendada establece cuatro clases: antracita, hulla, turba y lignito.

- Antracita: carbón duro que tiene el mayor contenido de carbono fijo y el menor en materia volátil de los cuatro tipos. Contiene aproximadamente un 87,1 % de carbono, un 9,3 % de cenizas y un 3,6 % de material volátil. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina. Se utiliza sobre todo como combustible y como fuente de carbono industrial. Aunque se inflama con más dificultad que otros carbones, libera una gran cantidad de energía al quemarse y desprende poco humo y hollín.

- Hullas: combustible fósil con una riqueza entre 75 y 90 % y un contenido en volátiles que oscila entre 20 y 35 %. Es negra, mate y arde con dificultad con una llama amarillenta. Se diferencia del lignito, por su mayor poder calorífico (entre 30 y 36 MJ/Kg.) (12 897,06 y 15 477,21 BTU/Lb). En la revolución industrial se le llamó carbón de piedra, se empleaba como combustible y en la siderurgia se usaba para obtener gas ciudad y una gran cantidad de productos químicos, dando lugar a la carboquímica. Ha sido sustituida por el petróleo y el gas natural. Todavía persisten dos aplicaciones:
 - Combustible en centrales térmicas
 - Obtención de coque mediante calcinación en hornos cerrados

- Turba: material orgánico compacto, de color pardo amarillento a negro. Se produce así una carbonificación lenta, en la que la turba es la primera etapa de la transformación del tejido vegetal en carbón. El

contenido en carbono aumenta del 40 % en el material vegetal original, al 60 % en la turba. Tiene un poder calorífico inferior a 8,4 MJ/Kg. (3 611,35 BTU/Lb).

- Lignito: variedad del carbón de calidad intermedia entre el carbón de turba y el bituminoso. Suele tener color negro pardo y estructura fibrosa o leñosa. Tiene capacidad calorífica inferior 17 200 KJ/Kg (7 394,67 BTU/Lb) a la del carbón común debido al contenido en agua (43,4 %) y bajo de carbono (37,8 %). El alto contenido de materia volátil (18,8 %) provoca la desintegración del lignito expuesto al aire. El término grado se refiere al estado de carbonización que ha llegado el proceso de metamorfismo. En otro tipo de clasificación del carbón se tendría en cuenta el aumento de grado acompañado de:
 - Disminución de la humedad natural del carbón.
 - Disminución de la cantidad de materias volátiles que se desprenden por calentamiento.
 - Aumento de carbono fijo, es decir, la cantidad de residuos de carbón o coque que quedan después de calentar el carbón.
 - Aumento de potencia calorífica.

El carbón se utiliza en la industria siderúrgica como coque, la industria metalúrgica, los sistemas de calefacción central, la producción de gas y otros combustibles sintéticos y en las centrales carboeléctricas.

Los carbones bituminosos son coquizables, es decir, que mediante un proceso de destilación se elimina la materia volátil del carbón, quedando un carbón de muy buena calidad que se denomina coque

y que es de gran utilidad en la industria siderúrgica (producción de hierro y acero; este último es precisamente una aleación de hierro y carbono) y metalúrgica. El término bituminoso se refiere al grado de poder calorífico que tiene el carbón. Los carbones subbituminosos, llamados de flama larga por la forma en que se realiza la combustión, no se pueden transformar en coque y se utilizan en las centrales carboeléctricas.

- Líquido: existen varios tipos de combustibles líquidos que son derivados del petróleo como *fuel oil* núm. 6, la gasolina, el diésel. Hasta hace algunos años, en Guatemala, el bunker o *fuel oil* núm. 6 se quemaba en los ingenios azucareros durante el periodo de zafra en un 20 % y después de finalizada la zafra en un 100 %, cuando ya no exista consumo de bagazo como combustible para la generación de energía eléctrica; sin embargo, hoy día algunos de los mismos ya han instalado calderas con combustible sólido.

En este tipo de calderas se utiliza el bunker o también conocido para generar vapor. Es un combustible residual de la destilación y craqueo del petróleo. Es un producto viscoso y con ciertos grados de impureza cuyas características generales exigen métodos especializados para su empleo. La viscosidad es una de sus principales características y debe ser tomada en cuenta para su manejo adecuado. Su uso es principalmente industrial en calderas y quemadores como una fuente de producción de energía.

Está diseñado para usarse especialmente como combustible en hornos, secadores y calderas. También puede utilizarse para calentadores (unidades de calefacción) y en plantas de generación de energía eléctrica.

Sus propiedades principales son:

- Viscosidad: es una de las propiedades físicas que tiene mayor importancia en la utilización del producto. La norma nacional establece un valor máximo de 300 SSF (635 CST) a 50 °C. La viscosidad debe estar acorde a las especificaciones de los equipos, en lo que se refiere a bombas, filtros y características de los quemadores.
- Temperatura de inflamación: es fijada como un parámetro de seguridad. Tiene especial importancia en el manejo y almacenamiento del producto.
- Agua y sedimento: disminuye el poder calórico del combustible y la temperatura, favoreciendo el punto de rocío y la corrosión. Si presenta valores altos propicia la obstrucción de filtros y boquillas en los quemadores.
- Densidad: no tiene relación directa con las características del combustible, pero es un dato necesario para los cálculos de balance de energía.
- Poder calórico: por ser el búnker un combustible residual, el poder calórico depende de la composición del crudo de origen. Conocer este valor es importante para el cálculo del balance y costo energético del producto.
- Gaseoso: existen varios tipos de combustibles gaseosos como el butano, propano y el gas natural; también se puede mencionar el gas caliente de

recuperación (ciclo combinado) y altos hornos, estos gases de combustión son aprovechados por la caldera para la generación de vapor. La caldera de recuperación de calor se utiliza habitualmente en las instalaciones de cogeneración para aprovechar el calor latente de los gases de combustión, se genera vapor de agua aprovechando la energía disponible en los gases de escape de la turbina de gas, motores de combustión y en altos hornos de fundición, el cual se expande en la turbina de vapor. Las calderas convencionales queman el combustible con cantidad mínima de aire, a fin de minimizar las pérdidas por la chimenea, que asegura la combustión correcta. Las temperaturas que alcanzan los gases de combustión son altas, la diferencia de temperatura con el agua, o vapor, es grande, el flujo de calor es elevado y las dimensiones de la superficie de intercambio de calor pueden ser relativamente pequeñas.

Para una misma potencia térmica, las dimensiones de estas calderas son considerablemente mayores, la cantidad de gases es mucho mayor y no tienen zona radiactiva. Dado que, en la mayoría de los casos, los gases de escape que llegan a estas calderas son ricos en oxígeno, pueden utilizarse para quemar más combustible (postcombustión), si es necesario puede añadirse más aire, y aumentar la cantidad de calor generado sin modificar la potencia eléctrica del cogenerador. Así se tienen las calderas de recuperación con o sin postcombustión.

Las calderas de gas utilizan el gas natural para generar vapor. El gas natural extraído de los yacimientos, es un producto incoloro e inodoro, no tóxico y más ligero que el aire. Procede de la descomposición de los sedimentos de materia orgánica atrapada entre estratos rocosos y es una mezcla de hidrocarburos ligeros en la que el metano (CH_4) se encuentra en grandes proporciones, acompañado de otros hidrocarburos y gases

cuya concentración depende de la localización del yacimiento. El gas natural es una energía eficaz, rentable y limpia, y por sus precios competitivos y su eficiencia como combustible, permite alcanzar considerables economías a sus utilizadores. Por ser el combustible más limpio de origen fósil, contribuye decisivamente en la lucha contra la contaminación atmosférica, y es una alternativa energética que destacará en el siglo XXI por su creciente participación en los mercados mundiales de la energía.

1.4.2. Calderas de vapor y sus accesorios (acuotubular)

Para el correcto funcionamiento de una caldera acuotubular se necesitan además del hogar, accesorios que permitan el intercambio de calor de una manera eficiente y segura.

1.4.2.1. Horno u hogar

Un hogar es una cámara donde se efectúa la combustión. La cámara confina el producto de la combustión y puede resistir las altas temperaturas que se presentan y las presiones que se utilizan. Sus dimensiones y geometría se adaptan a la velocidad de liberación del calor, al tipo de combustible y al método de combustión, de tal manera que se haga lo posible por tener una combustión completa y se proporcione un medio apropiado para eliminar la ceniza.

Los hogares enfriados por agua se utilizan con la mayor parte de unidades de calderas, es decir en su gran mayoría, y para todos los tipos de combustible y métodos de combustión. El enfriamiento por agua de las paredes del hogar reduce la transferencia de calor hacia los elementos estructurales y, en

consecuencia, puede limitarse su temperatura a la que satisfaga los requisitos de resistencia mecánica y a la oxidación.

Las construcciones de tubos enfriados por agua facilitan el logro de grandes dimensiones del hogar y óptimas de techos, tolvas, arcos 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 hogares con enfriamiento por agua reduce las pérdidas de calor al exterior.

Las superficies absorbentes del calor en el hogar, lo reciben de los productos de combustión, en consecuencia, contribuyen directamente a la generación de vapor, bajando al mismo tiempo la temperatura de los gases que salen del mismo. Los principales mecanismos de transferencia de calor se efectúan en forma simultánea. Estos mecanismos incluyen la radiación entre sólidos que proviene del lecho o de las partículas de combustible, la radiación no luminosa de los productos de la 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.

Los hornos difieren en tamaño y forma, en la localización y esparcimiento de los quemadores, en la disposición de la superficie absorbente del calor y de la distribución de los arcos y tolvas. La forma de la llama y su longitud afectan la geometría de la radiación, la velocidad y distribución de absorción del calor.

1.4.2.2. Molinos

El molino de bolas es el equipo importante para pulverizar materias que han sufrido previamente un proceso de machaqueo. Se utiliza para reducir a polvo la materia prima mediante la rotación de un tambor que contiene bolas de acero o de otro material.

1.4.2.3. Ventiladores

El tiro creado por la acción de inyectores de aire vapor o mediante ventiladores centrífugos se conoce como tiro mecánico, el cual se requiere cuando deba mantenerse un determinado tiro con independencia de las condiciones atmosféricas y del régimen de funcionamiento de la caldera.

1.4.2.3.1. Ventilador de tiro forzado

El tiro forzado se obtiene soplando aire en el interior de los hogares herméticos bajo las parrillas y hogares mecánicos, o a través de quemadores de carbón pulverizado. Se puede decir que la finalidad del ventilador de tiro forzado es proporcionar el aire necesario para la combustión.

El aire del tiro forzado es el que pasa a través del calentador de tubos, aprovechando los gases de combustión que se dirigen a la chimenea. El hecho de que se precaliente el aire ayuda notablemente a realizar una buena combustión.

1.4.2.3.2. Ventiladores de tiro inducido

El tiro inducido se consigue con un ventilador de chorro o con un ventilador centrífugo colocado en los humerales, entre las calderas y las chimeneas, o en la base de esta. El efecto de tiro inducido consiste en reducir la presión de los gases por debajo de la presión atmosférica y descargar los gases a la chimenea con una presión positiva. Cuando se emplea una combinación de tiros inducido y forzado de manera que sobre el fuego del hogar la presión es prácticamente la atmosférica, se dice que el tiro es equilibrado.

1.4.2.3.3. *Over fire*

Tiene como finalidad absorber una determinada cantidad de aire suministrado por el tiro forzado, el cual llegará a la parte inferior de la entrada de combustible de la caldera, para que le sirva como atomizador y pueda alimentar al mismo tiempo con oxígeno la llama de combustión.

1.4.2.4. Sopladores de hollín

Los sopladores de hollín normalmente se utilizan para evitar la acumulación de depósitos que obstruyen el paso de los gases; además ayudan a mantener limpias las superficies exteriores de los tubos que componen la caldera, aumentando así la transferencia de calor desde los gases provenientes de la combustión. Los sistemas de sopladores de hollín se utilizan para mantener la eficiencia de la caldera y su capacidad por medio de la eliminación periódica de la ceniza y la escoria que se adhiere a las superficies que, así, pueden absorber calor. Por medio de corrientes violentas de vapor o aire que se producen en las boquillas del soplador de hollín, se desprende la ceniza seca que se adhiere a la pared, así como la escoria, que entonces, cae dentro

de un silo o viaja con el resto de los gases de combustión hacia el equipo de purificación.

Básicamente un soplador de hollín es un tubo perforado en el cual sale el vapor, generalmente saturado (por su volumen específico) que rota de acuerdo con la conveniencia del diseñador, puede ser a (90°, 120°, 140°, entre otros).

1.4.2.5. Separador de contaminantes

En la quema de ceniza en las calderas de la planta Las Palmas II, los sólidos residuales son arrastrados por los gases de combustión, requiriendo la instalación de sistemas de limpieza antes de las chimeneas para poder separar los contaminantes, utilizando la separación por medio de filtros de tela, los cuales atrapan los contaminantes antes de que estos salgan por las chimeneas.

1.4.2.6. Torres de enfriamiento

En los sistemas de climatización modernos y en ciertos procesos industriales, se generan grandes cantidades de calor que hay que disipar al ambiente, haciendo necesario el empleo de agua para la refrigeración del sistema. Sin embargo, se tendrían grandes pérdidas al desechar el agua caliente.

Una alternativa que permite ahorrar agua y reducir los costos económicos consiste en enfriar el agua mediante una torre de enfriamiento y devolverla de nuevo al circuito. Las torres de enfriamiento son por lo tanto dispositivos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. El proceso es económico comparado con

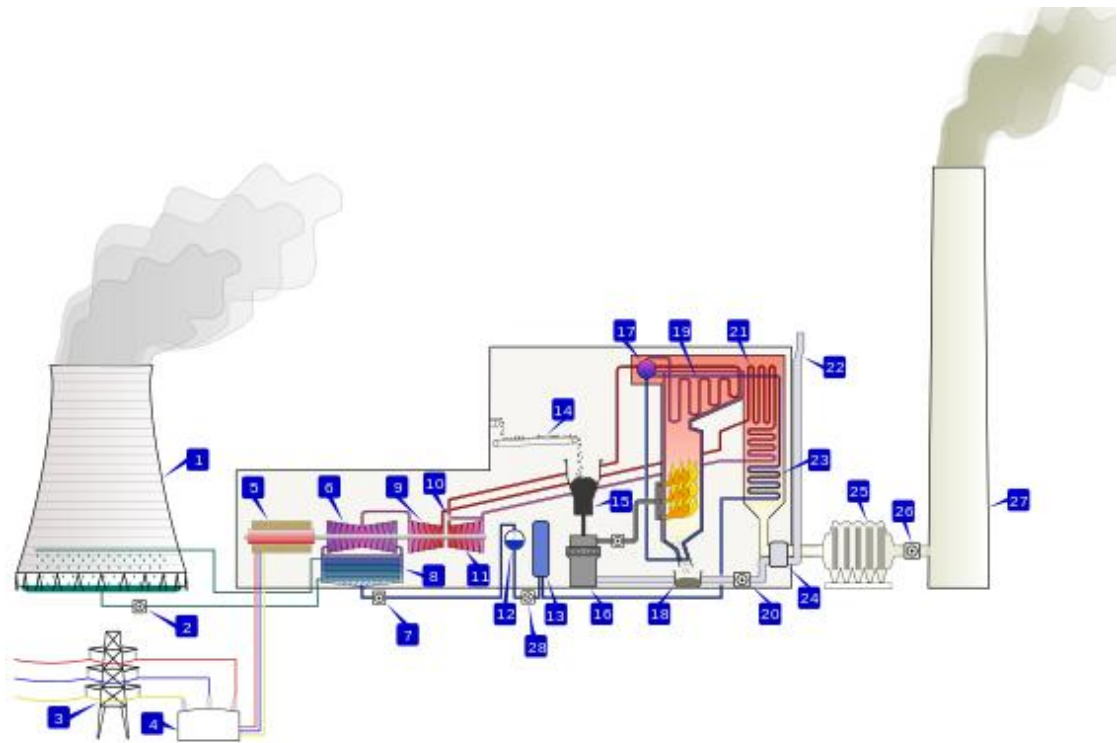
otros equipos de enfriamiento como los cambiadores de calor, donde el enfriamiento es a través de una pared.

El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en mayor superficie posible. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura menor a la temperatura del agua; en estas condiciones el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación) originando que la temperatura del aire y su humedad aumenten y la temperatura del agua descienda, la temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre.

Parte del agua que se evapora, causa la emisión de más calor, por eso se puede observar vapor de agua encima de la torre de enfriamiento.

En la figura 3 se muestra el diagrama de funcionamiento de una central térmica de carbón de ciclo convencional.

Figura 3. Diagrama de central térmica



- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Torre de refrigeración | 15. Tolva de carbón |
| 2. Bomba hidráulica | 16. Pulverizador de carbón |
| 3. Línea de transmisión (trifásica) | 17. Tambor de vapor |
| 4. Transformador (trifásico) | 18. Tolva de cenizas |
| 5. Generador eléctrico (trifásico) | 19. Súper calentador |
| 6. Turbina de vapor de baja presión | 20. Ventilador de tiro forzado |
| 7. Bomba de condensación | 21. Recalentador |
| 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 | |

Fuente: Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Central_termoeléctrica. Consulta: abril de 2015.

1.5. Inquemados

Cuando las reacciones de combustión no se realizan completamente, en los gases de combustión aparecen los inquemados, sustancias tales como hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos. Proceden de la combustión incompleta del combustible. Estos inquemados pueden ser de dos tipos: sólidos o gaseosos.

1.5.1. Sólidos

Se producen a partir de combustibles sólidos o líquidos. Los cuales están formados mayoritariamente por partículas de carbono e hidrocarburos fraccionados. La formación de estos inquemados puede deberse fundamentalmente a dos causas:

- Mal funcionamiento del quemador.
- Aire de combustión insuficiente y por tanto no se puede completar la reacción de combustión.

Estos inquemados sólidos se aprecian a simple vista por el ensuciamiento de los conductos de humo (hollín) y por la producción de humo oscuro. Lo cual produce dos efectos perjudiciales:

- Pérdida de potencia calorífica del combustible.
- Las partículas sólidas se irán depositando en la caldera, dificultando la transmisión de calor de los gases al agua; por tanto, esto va a provocar un aumento de las pérdidas de calor por aumento de la temperatura de los gases en el conducto de evacuación y chimenea.

1.5.2. Gaseosos

Están formados por monóxido de carbono e hidrocarburos ligeros. Las causas de su formación suelen ser:

- Insuficiente aire de combustión
- Mal funcionamiento del quemador
- Quemador inadecuado

Cuando el combustible es un gas, su combustión incompleta puede producir elevadas concentraciones de monóxido de carbono (el mejor indicador de la mala combustión) y otros hidrocarburos. Los hidrocarburos ligeros (principalmente metano) pueden provocar explosiones, a partir de concentraciones elevadas, en el conducto de evacuación o en la chimenea por inflamación espontánea.

2. FASE TÉCNICO PROFESIONAL

2.1. Descripción del sistema en el área de calderas de la planta Las Palmas II

La planta Las Palmas II cuenta con 4 calderas acuotubulares. Las calderas son de tipo circulación natural de Babcock & Wilcox Stirling. La capacidad máxima continua de producción de vapor es de 195 000 lb/hr a 950 °F y 1500 psi a la salida del sobrecalentador. Las condiciones de salida son, considerando la temperatura de 360 °F o más del agua de alimentación a calderas.

La temperatura de agua de alimentación a calderas es de 360 °F proveniente de un calentador tubular. La temperatura del vapor del sobrecalentador se controla con un atemperador, el cual aplica agua a alta presión, por una boquilla al vapor de salida; esto mantiene el valor deseado de temperatura, así como también controla la cantidad de combustible dentro del hogar.

El horno de la caldera es de 15' 6" de ancho, 19' 11" de profundidad y 72' 6" de alto, desde los cabezales de las paredes hasta el techo. Los gases de combustión salen del horno hacia un sobrecalentador secundario colgante. El sobrecalentador secundario consta de 22 secciones que están dispuestos en 8" de separación lateral. Cada sección consta de 12 filas de tubos de 2" de diámetro exterior (OD) sobre un espacio posterior de 2-3/4". Del sobrecalentador secundario, aproximadamente la mitad de las filas de tubos están expuestas a la radiación del horno.

El gas sale del sobrecalentador secundario y entra a un lado del sobrecalentador primario. El sobrecalentador primario consta de 23 secciones dispuestas en 4" de separación lateral. Cada sección originalmente constaba de 20 filas de tubos de 2 1/2" de diámetro externo. Debido a la temperatura excesiva del sobrecalentador, que fue descubierto durante la puesta en marcha de la caldera, se eliminaron las principales cuatro filas del primer y segundo paso del sobrecalentador primario, el cual ahora consta de 16 filas de tubos.

Los gases de combustión salen de los sobrecalentadores hacia al grupo de tubos llamado banco de generación de vapor. El grupo de tubos consta de 45 filas de ancho por 11 filas profundas de tubos verticales seguidas de 45 filas de ancho por 11 filas profundas de tubos descendentes. Los tubos ascendentes son de 2 1/2" de diámetro exterior mientras que los descendentes son de 2.31/32" OD

Los gases de combustión salen del banco de tubos de generación, hacia un calentador tubular de aire de dos etapas, el cual utiliza el calor residual de los gases de combustión de las calderas. El gas fluye a través de los tubos del calentador de aire, mientras que el aire de combustión, alrededor de estos. El calentador de aire, en su primera etapa se compone de unas 67 filas de ancho por 35 filas de profundidad. La segunda etapa consta de tres tipos diferentes de separaciones entre tubos, para optimizar las temperaturas del metal del tubo y reducir al mínimo los problemas de corrosión.

La unidad quema carbón pulverizado a través de cuatro quemadores circulares Babcock & Wilcox. El carbón es suministrado a los quemadores desde dos pulverizadores de tipo EL-44C, también marca Babcock & Wilcox, los cuales están equipados con clasificadores rotativos impulsados por motorreductores eléctricos de velocidad variable, utilizando variadores de

frecuencia. El aire primario para los pulverizadores se extrae del aire caliente de combustión, y el aire de combustión restante se suministra como aire secundario a la caja de viento del quemador (*windbox*).

El total de aire de combustión es suministrado por un ventilador de tiro forzado. El aire primario para los pulverizadores se extrae individualmente del aire de combustión a través de ventiladores para cada uno de los dos pulverizadores. El horno funciona de cero a un poco de presión negativa (vacío) con un ventilador de tiro inducido antes de que el gas de combustión entre en la chimenea. La caldera cuenta con sopladores de hollín para mantener los tubos de la caldera limpios en la superficie y evitar pérdidas por mala transferencia de calor, siendo estos de marca Diamond Power.

2.2. Tratamiento del carbón mineral

La función de la recepción del carbón y del sistema de almacenamiento es para descargar, transmitir, preparar y almacenar el carbón entregado a la planta, de manera que no pierda sus propiedades físicas ni químicas, garantizando su utilización correcta en el proceso de combustión.

2.2.1. Recepción y almacenamiento

El carbón es recibido en Puerto Quetzal en el sur de Escuintla, proveniente desde distintos países, entre ellos Colombia y Estados Unidos. Es vaciado por almejas hacia góndolas haladas por cabezales hasta la planta. Una vez allí se tienen dos opciones: almacenarlo en un área anexa a la planta, a la intemperie, pero con un diseño especial para el efecto y tenerlo para futuro uso, o llevarlo directamente al área de recepción de carbón dentro de la planta.

En el caso segundo, cuando el carbón es depositado en el edificio de recepción, se cuenta con dos filas de tres tolvas cada una.

La parte superior de cada tolva cuenta con una rejilla sobre la cual se estaciona o circula el camión y en la que se deja caer el carbón. La tolva está bajo nivel del suelo, la cual sirve de transferencia hasta una banda transportadora. Para evitar que se apelmace en los costados de la tolva se han instalado unos vibradores electromecánicos. Una vez el carbón esté sobre la banda, este es transportado hasta la torre de trituración, en el cual se muele para obtener diámetros entre $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de pulgada aproximadamente.

Desde la torre de trituración hay dos bandas transportadoras, las cuales a su vez tienen las siguientes dos opciones: trasladar el carbón hacia una torre de transferencia o trasladar el carbón hacia una bodega temporal de almacenaje, con capacidad para sostener la producción de la planta a plena carga de hasta cinco días continuos. En el caso que sean trasladados a bodegas temporales, durante eventos como asuetos laborales, fines de semana, cuando no hay transporte por carretera, se utiliza el carbón almacenado en dicha bodega y de allí es transportado por otra banda hacia la torre de transferencia.

Desde la torre de transferencia hay una banda inclinada que lleva el carbón hasta los silos que alimentan los pulverizadores, siendo ocho en total (dos por caldera, lo cual equivale a uno silo por pulverizador).

2.2.2. Su pulverización y mezcla con el aire primario

Cada caldera tiene dos pulverizadores marca Babcock & Wilcox, modelo EL-44C, y cada uno de estos tiene su propio silo, el cual puede almacenar aproximadamente 180 toneladas de carbón, suficiente para una operación de

36 horas continuas de cada pulverizador. Para mantener una producción de vapor de acuerdo con la necesidad de generación de energía eléctrica, se regula la cantidad de carbón a quemar, así como también la cantidad de aire combustible, los cuales están relacionados por la curva aire/combustible.

Desde el silo se alimenta el pulverizador por medio de un alimentador tipo gravimétrico, el cual modifica su velocidad para dar más o menos carbón según sea necesitado.

La capacidad del pulverizador está limitada por el índice de dureza del carbón y la fineza deseada. La temperatura de salida del pulverizador alcanzable está en función de la masa y temperatura del aire caliente primario disponible

El aire primario caliente que se necesita se basa en la masa y la temperatura requerida para secar el carbón dentro de los pulverizadores a un nivel aceptable, tal como se mide por la temperatura de salida del pulverizador. La temperatura mínima recomendada a la salida del pulverizador está en función de la eficiencia del transporte de carbón y la estabilidad de la flama del quemador. La temperatura máxima recomendada de salida del pulverizador está en función de la boquilla del quemador de carbón y el diferencial de temperatura aceptables del metal del pulverizador en la zona de molienda. La fineza mínima recomendada del pulverizador está también en función del rendimiento del quemador.

2.3. Medición de gases e inquemados dentro de los quemadores

El estado de ciertos equipos y procesos incrementa la cantidad de carbón mineral que se utiliza como combustible para la generación de llama en la

caldera, por lo que también deterioran cada vez más los equipos causando pérdidas e incrementando los costos de reparación y los gastos de combustible, ya que existe un desperdicio de carbón mineral en el proceso de combustión.

Además es de vital importancia analizar la situación, saber qué medidas tomar, que recursos debemos utilizar, los componentes y equipos periféricos de las máquinas que se deben diseñar para lograr la reducción de inquemados sin tener un aumento en la emisión de gases contaminantes de la chimenea y de esta manera obtener que las condiciones de trabajo cumplan con cualquier auditoría respecto de las normas de calidad con las que se trabaja en la planta.

Con la reducción de los inquemados, se logra reducir los gastos de combustible, ya que se realizaría el proceso de combustión con menor cantidad de carbón mineral y esto incrementaría las ganancias de producción de vapor. Durante la realización del proyecto, el mantenimiento permitirá detectar fallos de las calderas, la optimización de la mezcla de aires primarios y secundarios, análisis de finezas del carbón pulverizado, reducción de flujos de aire primario para relaciones aire/carbón y control de velocidades en los quemadores, detectar puntos débiles en la instalación, entre una larga lista de ventajas, para así lograr la reducción de inquemados y disminuir costos de producción.

Para empezar con la medición de inquemados se necesita tener un equipo especial que permita la extracción de cenizas en cada uno de los quemadores de las cuatro calderas.

2.3.1. Descripción de los equipos utilizados en el procedimiento de extracción de cenizas

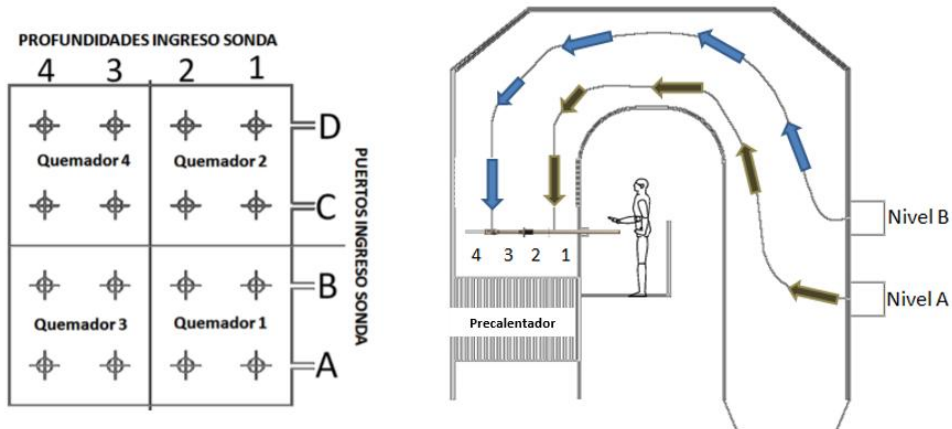
Para el procedimiento de extracción de cenizas en cada uno de los quemadores de las cuatro calderas de la planta Las Palmas II, se necesitaron equipos especiales para medir y estudiar los datos obtenidos; de esta manera determinar las causas y soluciones de los problemas de inquemados que se presentan.

2.3.1.1. Sondas extractoras de ceniza y gases

Según el plan para empezar con el procedimiento de reducción de inquemados, se tuvo el suministro de sondas extractoras de ceniza y gases; de las cuales hubo supervisión de montaje en instalación en todos los cuatro puertos de medición de emisiones de cada caldera. Como son cuatro calderas, hubo una instalación de 16 sondas en total. El personal de Duke Energy realizó el montaje y actividades involucradas, bajo los lineamientos de la empresa Valvexport.

Se presentan las zonas correspondientes a los quemadores en el ducto donde se realizaron las mediciones al ingresar por los puertos A, B, C y D. En las profundidades 1 y 2, se estarán analizando los quemadores correspondientes al nivel A, y en las profundidades 3 y 4 se analizarán los quemadores del nivel B.

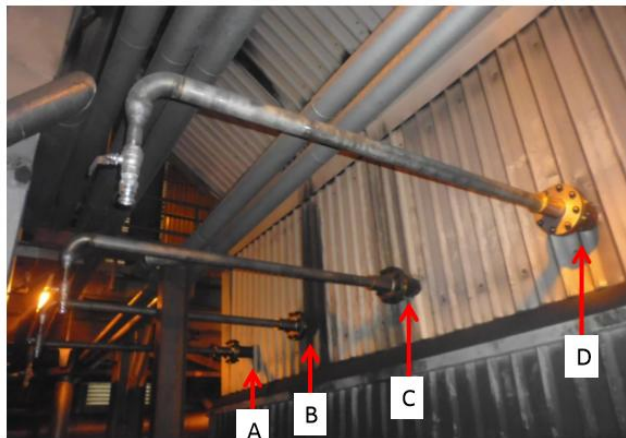
Figura 4. Puertos de medición de los quemadores



Fuente: archivos de Valvexport, Inc.

En la figura 5 se muestra la identificación de las sondas instaladas en cada puerto por donde se realizaron mediciones de gases y cenizas. En cada puerto se ingresó la sonda a 4 profundidades equidistantes a la sección del ducto.

Figura 5. Identificación de sondas instaladas



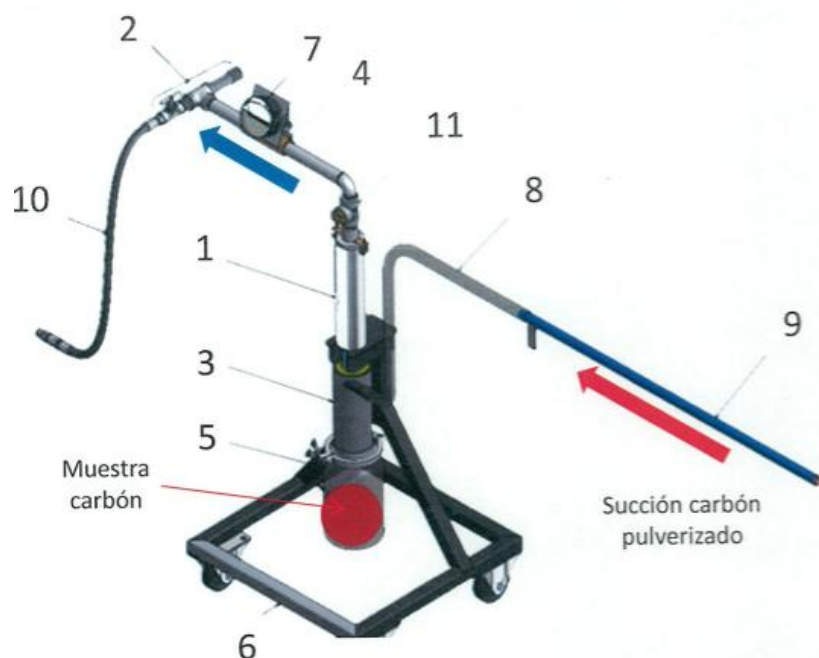
Fuente: planta Las Palmas II, Duke Energy, Guatemala.

2.3.1.2. Equipo extractor de muestras de carbón

Se presenta el sistema completo para extracción de carbón pulverizado. La sonda (9) es introducida en el tubo que transporta el carbón. Con la válvula del conjunto eyector (2) se genera un vacío que extrae isocinéticamente la muestra de carbón.

La tabla adjunta identifica cada uno de los elementos que conforman el sistema extractor. Los elementos del conjunto para extracción son entregados en una maleta que permite su transporte al lugar de instalación protegiéndolos contra daños.

Figura 6. **Extractor de muestras de carbón**



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Tabla I. **Lista de partes del extractor de muestras de carbón**

Lista de partes	
Ítem	Nombre
1	Filtro ASTM
2	Conjunto eyector
3	Separador ciclónico
4	Venturi succión biocinética
5	Recipiente recolector de muestras
6	Base rodante equipo ASTM
7	Manómetro Dawyer
8	Manguera de extracción de muestras
9	Sonda ASTM
10	Manguera alimentación neumática
11	Punto muestreo gases

Fuente: elaboración propia.

Una vez las sondas de extracción se encontraban previamente instaladas en cada una de las calderas, se realizó la medición en 16 puntos sobre la sección transversal al ducto de gases; en cada punto se extrajeron muestras por 10 minutos generando el mayor vacío con el equipo extractor de muestras de cenizas y gases de combustión.

Figura 7. **Procedimiento extracción de cenizas**



Fuente: planta Las Palmas II, Duke Energy, Guatemala.

La extracción de la muestra de carbón debe ser isocinética (la velocidad de succión en la sonda debe ser igual a la velocidad en el tubo que transporta el carbón). La razón para esto es que al extraer las muestras con velocidades diferentes, presentan los problemas descritos en la figura 8.

Figura 8. **Problemas en la extracción de muestras**

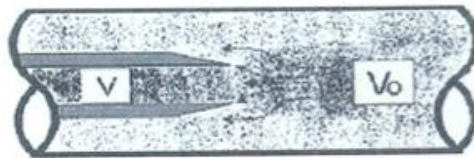
Velocidad en sonda superior a velocidad en tubo

Muestra contiene menos partículas gruesas



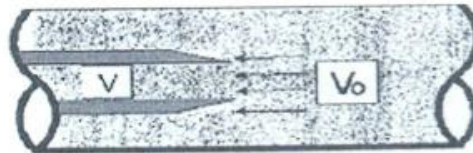
Velocidad en sonda inferior a velocidad en tubo

Muestra contiene mayor cantidad de partículas gruesas



Velocidad en sonda igual a velocidad en tubo

Muestra representativa, flujo isocinetico



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

2.3.2. Registro de emisión de gases y ceniza, evaluando el estado inicial de inquemados

La planta Las Palmas II tiene operando 4 calderas, por lo que se realizaron 4 registros de emisiones de gases y ceniza, evaluando inquemados en malla, para identificar los inquemados generados por el quemador. Esta medición servirá de base para establecer metas de reducción de inquemados.

Tabla II. Mediciones de porcentaje de dióxido en malla

Puerto	Caldera 1				Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	1,4	1,8	1,3	1,4	3,5	2,7	3,5	4,4	1,5	1,4	2,0	1,1	5,0	3,8	2,2	1,7
C	5,8	4,7	3,1	2,1	4,3	5,4	4,0	4,5	1,8	4,2	3,6	1,8	3,7	2,9	2,4	1,6
Dis air slide	56,0		57,0		55,0		56,0		32,0		32,0		36,0		31,0	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	3,2	3,2	2,1	3,0	5,2	5,8	5,7	7,5	3,0	2,1	3,0	2,2	3,8	2,2	1,4	1,7
A	2,9	2,6	3,0	2,8	7,5	5,9	7,3	5,2	1,6	2,5	2,5	1,6	4,0	2,6	1,9	2,0
Dis air slide	36,0		36,0		35,0		33,0		30,0		28,0		44,0		35,0	
Promedio	Caldera 1				Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	3,4		2,0		4,0		4,1		2,2		2,1		3,9		2,0	
C	56,0		57,0		55,0		56,0		32,0		32,0		36,0		31,0	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	3,0		2,7		6,1		6,4		2,3		2,3		3,2		1,8	
A	36,0		36,0		35,0		33,0		30,0		28,0		44,0		35,0	
Dis air slide	36,0		36,0		35,0		33,0		30,0		28,0		44,0		35,0	

Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Tabla III. Mediciones de monóxido de carbono en malla

	Caldera 1 (ppm)				Caldera 2 (ppm)				Caldera 3 (ppm)				Caldera 4 (ppm)			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	834	1449	1958	2172	330	1256	134	125	2800	2747	2893	2586	8	261	1728	2349
C	17	30	274	584	286	47	264	70	1870	1521	515	3529	113	746	199	1443
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	739	349	2548	149	1639	67	10	13	450	660	469	1488	61	1310	1635	1419
A	681	113	101	107	75	1978	82	1900	2077	213	418	1094	97	1037	682	1711
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	
Promedio	Caldera 1 (ppm)				Caldera 2 (ppm)				Caldera 3 (ppm)				Caldera 4 (ppm)			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	583		1247		480		148		2235		2631		282		1430	
C	56		57		55		56		32		32		36		31	
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	471		726		940		501		850		867		626		1362	
A	36		36		35		33		30		28		44		35	
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	

Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Tabla IV. Mediciones de porcentaje de inquemados en malla

Caldera 1					Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	6,0	6,7	5,7	9,1	6,7	7,5	6,5	7,4	13,6	12,5	15,0	12,1	11,0	10,8	12,3	12,1
C	7,9	6,4	5,6	7,0	6,6	5,3	4,5	6,8	13,2	11,9	11,4	12,5	9,4	9,1	19,3	19,4
Distancia air slide	56,0		57,0		55,0		56,0		32,0		32,0		36,0		31,0	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	11,0	6,7	9,1	11,1	10,6	10,7	13,0	15,9	15,8	18,1	20,3	27,7	9,9	8,45	11,6	12,8
A	13,0	9,1	11,4	12,8					21,1	14,8	13,6	19,8	6,5	6,5	9,6	10,2
Distancia air slide	36,0		36,0		35,0		33,0		30,0		28,0		44,0		35,0	

Caldera 1					Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	7		7		7		6		13		13		10		16	
C	56		57		55		56		32		32		36		31	
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	10		11		11		14		17		20		8		11	
A	36		36		35		33		30		28		44		35	
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	

Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Tabla V. **Peso muestras de cenizas en malla**

	Caldera 1				Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	128	106	161	279	901	70	122	112	65	118	78	110	120	112	102	1114
C	75	141	168	357	104	110	161	114	96	68	218	89	83	76	47	67
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	110	106	98	194	69	65	76	37	93	61	47	15	119	122	99	116
A	55	142	81	172					23	40	79	30	144	186	85	231
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	
Promedio	Caldera 1				Caldera 2				Caldera 3				Caldera 4			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	112		241		94		127		87		124		98		333	
C	56		57		55		56		32		32		36		31	
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	103		136		67		56		55		43		143		133	
A	36		36		35		33		30		28		44		35	
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	

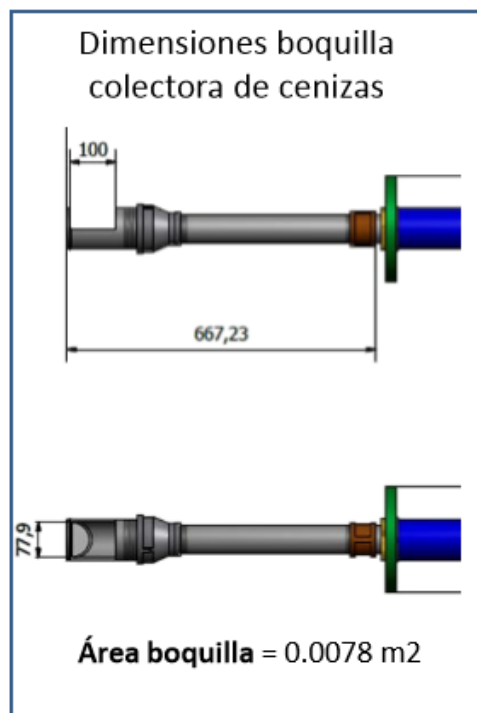
Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Los pesos de las muestras en la tabla V están dados en gramos.

Cálculo del flujo de cenizas: cada sonda se ingresó a 4 profundidades diferentes para recolectar en 4 puntos del ducto (profundidad ducto 2,2 m) repitiendo esta labor en 4 puertos, se cubrirá todo el ducto con 16 puntos de medición. Esto permite calcular los flujos de cenizas y comparar los niveles de dióxido y monóxido de carbono correspondientes a los cuatro quemadores. La fórmula que se utilizó para definir el flujo promedio de cenizas en cada una de las 16 zonas correspondientes a los 16 puntos de medición es:

$$\text{Flujo de cenizas } \frac{\text{gr}}{\text{hr}} = \text{peso muestra gr} \times \frac{60 \text{ min/hr}}{\text{tiempo recolección min}} \times \frac{\text{Área ducto m}^2}{16 \times \text{Área boquilla (m}^2)}$$

Figura 9. **Dimensiones boquilla colectora de cenizas**



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Con los pesos de cenizas obtenidos en cada uno de los 16 puntos de medición en malla, la relación de áreas entre boquilla (0,0078 m²) / sección punto muestreo (9,9 m²) y un tiempo de muestreo en cada punto de 10 minutos, se presentan en las tablas adjuntas los flujos en cada punto y el flujo promedio por cada quemador.

$$\text{Área sección} = \text{profundidad} \times \text{ancho} = 2,2 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 9,9 \text{ m}^2$$

Por ejemplo, según la tabla V en la caldera 1, el peso de la muestra de ceniza que se extrajo del puerto A en la profundidad 1 es de 172 gramos (0,3784 libras). Por lo tanto según los datos de las dimensiones de la boquilla, sección del punto de muestreo y el tiempo medido se calculó el flujo de ceniza:

$$\text{Flujo de cenizas} = 172 \text{ gr} \times \frac{60 \text{ min/hr}}{10 \text{ min}} \times \frac{9,9 \text{ m}^2}{16 \times 0,0078 \text{ m}^2} = 81\,865,38 \text{ gr/hr}$$

$$\text{Flujo de cenizas} = 81\,865,38 \text{ gr/hr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{2,2 \text{ lbs}}{1 \text{ kg}} = 180 \text{ lbs/hr}$$

Por lo tanto, 180 libras/hora es el flujo de ceniza que se midió de la caldera 1, de la profundidad 1 en el puerto A. De esta manera se midieron todas las muestras de peso de ceniza tabuladas en la tabla VI.

Tabla VI. Flujo de cenizas en malla

Puerto	Caldera 1 lb/hr				Caldera 2 lb/hr				Caldera 3 lb/hr				Caldera 4 lb/hr			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	135	111	169	293	95	74	128	117	68	124	83	115	126	117	107	1169
C	79	148	176	374	109	115	169	119	102	72	229	94	87	80	50	71
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	115	112	103	204	73	68	80	39	98	64	49	16	125	128	104	122
A	57	149	85	180					24	42	83	32	151	196	89	242
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	

Promedio	Caldera 1 lb/hr				Caldera 2 lb/hr				Caldera 3 lb/hr				Caldera 4 lb/hr			
Puerto	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
	Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2		Quemador 4		Quemador 2	
D	118		253		98		133		92		130		102		349	
C	56		57		55		56		32		32		36		31	
Distancia air slide	56		57		55		56		32		32		36		31	
	Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1		Quemador 3		Quemador 1	
B	108		143		70		59		57		45		150		139	
A	36		36		35		33		30		28		44		35	
Distancia air slide	36		36		35		33		30		28		44		35	

Fuente: Duke Energy, Guatemala.

A través de los datos tabulados anteriormente es más fácil concluir la razón por la cual el valor de los inquemados en cada uno de los quemadores es alto.

2.3.3. Diagnóstico de la situación

La tabla VII presenta los resultados promedios generales por caldera de dióxido, monóxido de carbono e inquemados.

Tabla VII. **Medición promedio gases dióxido, monóxido de carbono e inquemados**

PROMEDIOS		Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3	Caldera 4
O ₂	%	2,8	5,2	2,2	2,7
CO	Ppm	728,0	493,0	1471,0	911,0
Inquemados	%	8,7	9,5	15,8	11,2

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos generales se pueden proyectar las metas de inquemados considerados alcanzables, después de realizar los ajustes e instalación de elementos para mejorar la combustión.

Tabla VIII. **Metas logrables en reducción de inquemados**

INQUEMADOS	ACTIVIDADES A REALIZAR
Menos de 9 %	Regulación del flujo de aire secundario en cada quemador.
Menos de 7 %	Eliminación de diamantes en tuberías de aire primario.
Menos de 5 %	Incorporación de anillos eliminadores de <i>roping</i> dentro de cada quemador.

Fuente: elaboración propia.

La razón por la cual se concluyó que la mayor reducción de inquemados corresponde a la regulación del aire, es la evidencia encontrada al medir la presencia de dióxido y monóxido de carbono e inquemados, en cada caldera para cada quemador, según la posición de los registros (*air slides*).

La figura 10 es una gráfica que presenta la relación entre el factor de flujo K y el porcentaje de inquemados promedio para las calderas 1, 3 y 4. El factor de flujo es calculado así:

$$K = \sqrt{\Delta P} \times \frac{\% \text{ apertura del Air slide}}{100}$$

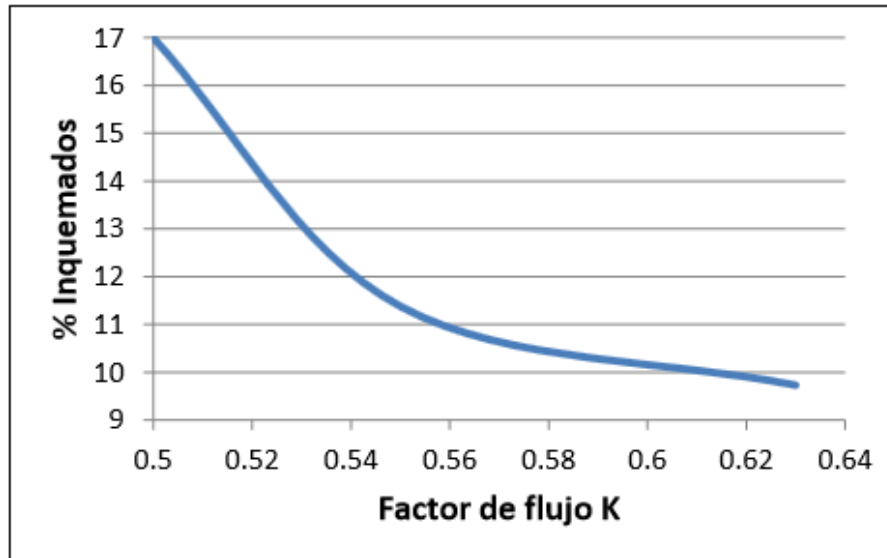
Donde:

$$\Delta P = \text{Presión windbox} - \text{Presión del hogar}$$

La presión del *windbox* o aire secundario se mantiene en 2 pulgadas de agua. El hogar de la caldera trabaja en vacío por lo que su presión es de aproximadamente -1 pulgada de agua. Por ejemplo, la caldera 3 tiene inquemados promedio = 15,8 que corresponden con los *air slides* abiertos entre 30 %. Por lo tanto:

$$K = \sqrt{2 - (-1) \text{ inH20}} \times \frac{30}{100} = 0,52$$

Figura 10. **Gráfica correlación de inquemados para calibración de *air slides***



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

A través de la gráfica se puede observar que la calibración de *air slide* y presión en *windbox*, teniendo en cuenta la presión del hogar de forma tal que el factor K exceda 0,6, es fundamental para reducir los inquemados.

2.4. Criterios de ingeniería en el diseño de los equipos para reducción de inquemados

Para lograr la reducción de inquemados según las metas consideradas alcanzables dentro de la planta Las Palmas II, es necesario realizar ajustes o nuevos diseños en los equipos y accesorios que funcionan dentro de la planta, para garantizar el cumplimiento de un trabajo eficiente

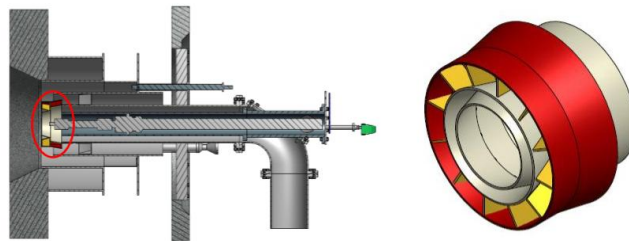
2.4.1. Eliminación de diamantes en tuberías de aire primario

Los diamantes son secciones de metal que están alrededor de la tubería que inyecta el diésel, el cual sirve como combustible para encender la llama piloto. Esta tubería está dentro del tubo que transporta la mezcla de aire combustible o aire primario. Son 6 secciones que vienen con el diseño de la tubería de los quemadores.

El propósito de los diamantes es que la tubería que inyecta el diésel quede sujeta y no se balancee dentro de la tubería que transporta el aire primario. Los diamantes en realidad no tienen ninguna ventaja hacia la forma en que la mezcla aire-carbón entra al horno; es más, la perjudica; por lo que al momento de retirarlos se incrementaría la cantidad de aire sucio que entra en la caldera y se aprovecharía mucho mejor la ceniza, ya que se tendría un mejor control de la cantidad de aire primario que entra a los quemadores y de esta manera se reduciría el porcentaje de inquemados.

La manera en que se planea solucionar el problema de balanceo de la tubería es incorporar láminas de menor sección para que sujeten las tuberías, de tal manera que no afecten la cantidad de aire primario que entra a los quemadores.

Figura 11. **Solución para la eliminación de diamantes en las tuberías**



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

2.4.2. Incorporación de anillos eliminadores de *roping* dentro de cada quemador

Después de revisar los datos de la investigación se cree que las condiciones de entrada de los aires y carbón a los quemadores no han sido optimizadas para que sirvan de base a una mejora en el diseño de los quemadores. Esta parte de la investigación tiene como propósito proponer unas etapas previas de optimización y medición antes de realizar cambios internos a los quemadores.

Durante el muestreo de carbón se encontraron diferencias importantes de distribución dentro de algunos tubos, las cuales se califican con el índice de *roping* (peso muestra puerto 1/ peso muestra puerto 2). Por lo que se recomienda instalar elementos *antiroping* que minimicen estas diferencias, sin perturbar los balances de flujos de aire. Se debe comenzar por el tubo hacia el quemador 4-4 que experimenta el peor índice. Ver tabla IX.

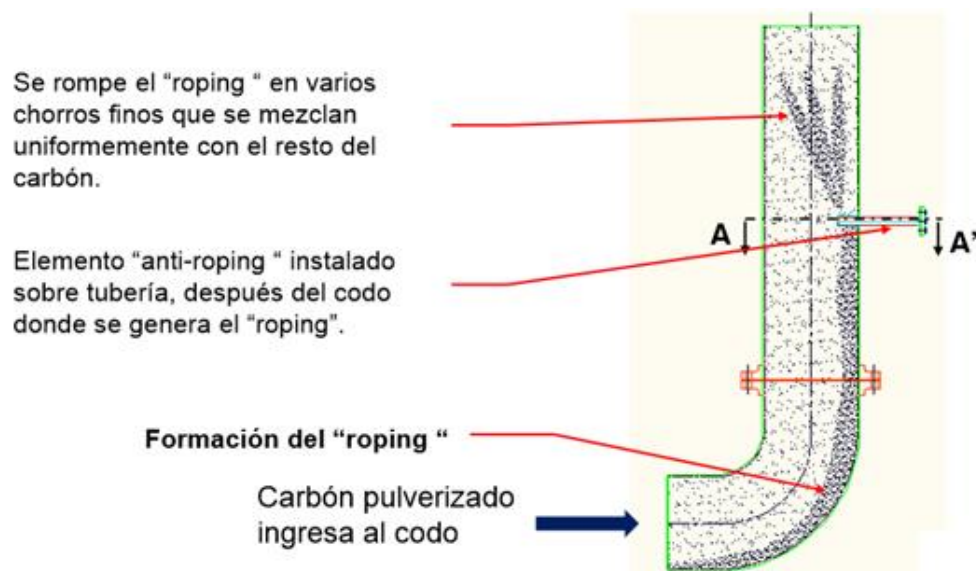
Tabla IX. **Distribución de aire/carbón en tuberías**

Caldera	Molino	Tubo izquierdo			Tubo derecho		
		% desv. flujo carbón	% desv. aire	Índice <i>roping</i>	% desv. carbón	% desv. aire	Índice <i>roping</i>
1	A	ND					
	B	8,3	7,6	1,1	-8,3	-7,6	1,3
2	A	-1,5	3,3	1,3	1,5	-3,3	1,3
	B	-1,4	4,7	1,3	1,4	-4,7	2,3
3	A	-11,2	-3	1,7	11,2	3	1,1
	B	0,1	5,7	1,7	-0,1	-5,7	3,5
4	A	-5,7	1	2,6	5,7	-1	1,9
	B	-8,4	1	1,3	8,4	-1	6,5

Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Para la distribución uniforme de carbón dentro de cada tubo se recomienda instalar elementos *antiroping* ajustables, de forma tal que se pueden calibrar, redistribuyendo el carbón y regulando flujo de aire simultáneamente.

Figura 12. **Distribución uniforme de carbón**



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

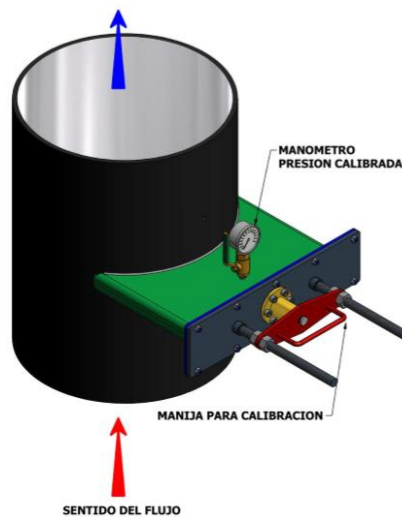
Instalación – calibración: el elemento se instala soldándolo a la pared del tubo después de realizar un corte en la pared, cubriendo un sector de 90°, con un ancho de 1". Una perilla de calibración permite deslizar el disco ranurado, desde la posición totalmente retraída hasta otra donde genera una alta obstrucción al trenzado de carbón.

Figura 13. **Diseño de antiroping**



Fuente: Valvexport, Inc.

Figura 14. **Elemento de antiroping**



Fuente: Valvexport, Inc.

2.5. Operación del aire primario y secundario en las calderas

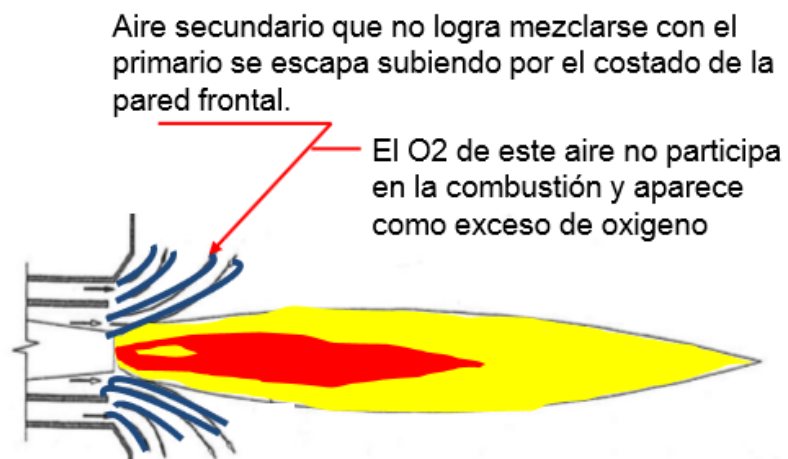
Dentro del proceso de la combustión del carbón pulverizado se encuentra que la mezcla adecuada de aire primario y carbón en el molino es fundamental, afectando los siguientes parámetros:

- Fineza: excesivo aire primario acarrea partículas de mayor tamaño, afectando la fineza en malla 50.

- Balance de aires entre tubos: excesivo aire primario incrementa desbalances.
- Balance de carbón entre tubos: excesivo aire primario incrementa desbalances.
- Mezcla de aires primario y secundario: excesivo aire primario ocasiona excesivas velocidades dentro del quemador, impidiendo la mezcla homogénea con el aire secundario.
- Forma y estabilidad de la llama: excesivo aire primario, alarga la llama afectando su estabilidad. También afecta la distribución de oxígeno y de temperaturas dentro del hogar.

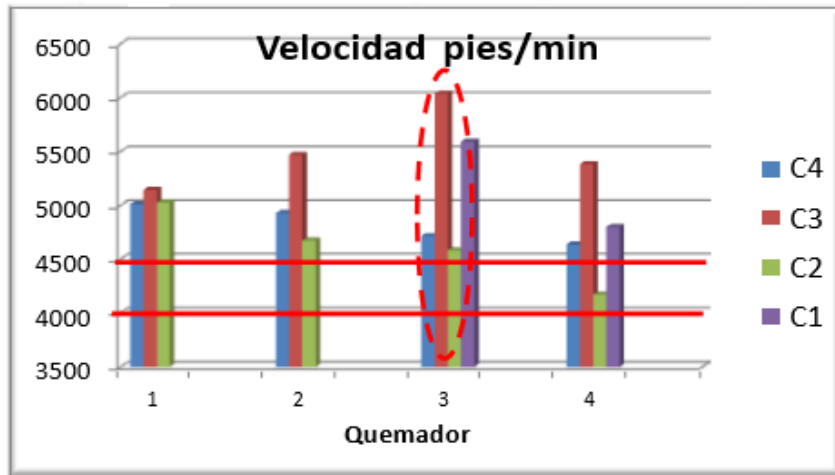
Las velocidades ideales están entre 4 000 y 4 500 pies/min. La gráfica presenta las velocidades en los quemadores de las unidades en Las Palmas II (ver figura 16). Se puede observar que todas las calderas presentan excesivas velocidades, especialmente en los molinos hacia el segundo nivel de quemadores. El peor caso se presenta en el quemador 3 de la caldera 3.

Figura 15. **Llama del quemador**



Fuente: Valvexport, Inc.

Figura 16. **Análisis de velocidades aire/carbón dentro de cada quemador**



Fuente: Duke Energy, Guatemala.

Se propone reducir todos los aires primarios de acuerdo con la figura 15.

2.6. Programa de mantenimiento a equipos involucrados en el proceso de reducción de inquemados

Es importante la realización de un programa de mantenimiento para los nuevos equipos y accesorios utilizados en el proceso de reducción inquemados, para mantener o alargar su vida útil dentro de la empresa.

2.6.1. Conceptos de mantenimiento

El área de actividad de mantenimiento industrial es de vital importancia en el ámbito de la ejecución de las operaciones en la industria. De un buen mantenimiento depende no solo un funcionamiento eficiente del extractor de ceniza, sino que además, es preciso llevarlo a cabo con rigor para conseguir otros objetivos como el control del ciclo de vida de equipos, sin disparar los costos destinados a mantenerlos.

Las estrategias convencionales de “reparar cuando se produce la avería” ya no sirven. Fueron válidas en el pasado, pero se es consciente que esperar a que se produzca la avería para intervenir, es incurrir en costos excesivamente elevados (pérdidas de producción, diferencias en la calidad, incremento de tiempos muertos, entre otros) y por ello la empresa se planteó llevar a cabo procesos de prevención de estas averías mediante un adecuado programa de mantenimiento. La evolución del mantenimiento se estructura en las cuatro siguientes generaciones:

- 1ª. generación: mantenimiento de averías. Se espera a que se produzca la avería para reparar.
- 2ª. generación: se empiezan a realizar tareas de mantenimiento para prevenir averías. Trabajos cíclicos y repetitivos de frecuencia normal.
- 3ª. generación: se implementa el mantenimiento a condición, es decir, se realizan monitorizaciones de parámetros de los equipos utilizados en la reducción de inquemados, de los cuales se efectuarán los trabajos propios de sustitución o reacondicionamiento de los elementos.
- 4ª. generación: se implantan sistemas de mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, de la organización y ejecución del mantenimiento. Se establecen los grupos de mejora y seguimiento de las acciones.

Sistema del tipo TPM (mantenimiento productivo total): para que la implementación, ajustes de programación preventiva y la puesta a punto del sistema completo puedan dar buenos resultados, es necesario que el jefe de mantenimiento de la planta se comprometa con:

- Disponibilidad de tiempo de un empleado de mantenimiento por área de trabajo (mecánica, eléctrica, instrumentación, entre otros) por lo menos

cuatro horas diarias mientras el proyecto está en proceso de parametrización y recolección de datos.

- Disponibilidad de por lo menos un computador de tiempo completo, donde el grupo de trabajo elegido, tanto personal interno como externo, puedan acceder fácilmente con las debidas reglamentaciones que ello exige.
- Disponibilidad de tiempo de personal administrativo, involucrado con el departamento en cuestión, para el seguimiento de cronograma, asignación de cumplimiento de tareas específicas, validación de datos y tareas ingresadas a la base de datos.

2.6.2. Tipos de mantenimiento

En la planta Las Palmas II, por su proceso continuo de trabajo, se tienen en cuenta 3 tipos de mantenimiento para asegurar al mínimo las pérdidas de tiempo efectivo de producción de vapor, además de asegurar el buen funcionamiento del sistema de calderas. Los tres tipos de mantenimiento son: mantenimiento de averías, preventivo, y predictivo, los cuales se describen en los párrafos siguientes.

2.6.2.1. Mantenimiento de averías

Consiste en la aplicación de programas destinados a eliminar condiciones de trabajo indeseables en el sistema de reducción de inquemados, cumpliendo con los reglamentos y normas de la planta. Este tipo de control, al ser aplicado en la planta, busca detectar equipos con problemas, teniendo el registro de funcionamiento de las máquinas en todo momento para conocer el grado y causas de los problemas para realizar inmediatamente la corrección adecuada.

2.6.2.2. Mantenimiento preventivo

Son las inspecciones periódicas de equipos para evaluar su estado de funcionamiento e identificar fallas, además de prevenir y poner en condiciones el equipo para su óptimo funcionamiento (limpieza, lubricación y ajuste).

2.6.2.3. Mantenimiento predictivo

Consiste en el monitoreo continuo de máquinas y equipos con el propósito de detectar y evaluar cualquier pequeña variación en su funcionamiento, antes de que se produzca una falla.

La nueva misión del mantenimiento es mantener la operación de los procesos de producción y servicio de las instituciones, sin interrupciones no programadas que causen retraso, pérdidas y costos innecesarios, todo ello al menor costo posible. Aquí es prioritario resaltar la importancia que tienen los términos calibración y metrología, dado que los equipos especializados de salud necesitan de estos procesos, debido al grado de complejidad y exactitud requerida en su funcionamiento.

2.6.3. Objetivos del programa de mantenimiento

El sistema de mantenimiento busca lo siguiente:

- Prolongar la vida de los equipos que hacen parte del proceso de extracción de ceniza.
- Optimizar operaciones en el sistema de reducción de inquemados y extracción de ceniza del área de calderas en situaciones de emergencia y crisis, disminuyendo las acciones correctivas en el lugar.

- Establecer un programa de control de repuestos y equipos destinados a resolver inconvenientes de funcionamiento de los equipos que están trabajando en el proceso.

Para que el concepto del sistema de mantenimiento se cumpla, el departamento de mantenimiento debe intervenir en los procesos de compra de equipo, almacenamiento, en los procesos para determinar la vida de baja de equipos y elementos que ya han cumplido sus ciclos de vida.

2.7. Incremento de ganancias por reducción de inquemados y recuperación de gastos de inversión

Actualmente, la planta Las Palmas II consume 900 toneladas diarias de carbón mineral como combustible. De estas 900 toneladas de carbón consumidas por los quemadores, el 10 % se convierte en ceniza, o sea 90 toneladas. Dentro de estas 90 toneladas de ceniza, se ha determinado según los estudios realizados, que el 12 % son inquemados. Por lo tanto:

$$90 \text{ ton} \times 12 \% = 10,8 \text{ toneladas}$$

10,8 toneladas de carbón mineral es lo que se desperdicia diariamente a través de la ceniza.

Si la tonelada de carbón mineral cuesta 110 dólares, y se trabajan 330 días al año, se determina que:

$$10,8 \text{ ton} \times 110 \text{ USD} \times 330 \text{ días} = 392\,040 \text{ USD}$$

Se desperdicia aproximadamente, 392 040 USD por año, a través de inquemados existentes en la ceniza.

A través del trabajo de investigación, las metas de inquemados que se consideran alcanzables, después de realizar los ajustes e instalación de elementos para mejorar la combustión, es menos del 5 %.

Por lo tanto:

$$90 \text{ ton} \times 5 \% = 4,5 \text{ toneladas}$$

$$4,5 \text{ ton} \times 110 \text{ USD} \times 330 \text{ dias} = 163 \text{ 350 USD}$$

Se lograría reducir a 163 350 USD al año, la cantidad de dinero desperdiciado a través de inquemados.

Se tendría un ahorro por año de 228 690 USD, según la siguiente ecuación:

$$392 \text{ 040 USD} - 163 \text{ 350 USD} = 228 \text{ 690 USD}$$

El ahorro mensual por reducción de inquemados a menos del 5 % sería de 19 057,5 USD.

$$\frac{228 \text{ 690 USD}}{12 \text{ meses}} = 19 \text{ 057,5 USD/mes}$$

Si el costo de inversión del proyecto fue de aproximadamente 135 000 USD, se estima que la recuperación de los gastos de inversión se obtendrán en aproximadamente 7 meses.

$$\frac{135\,000\text{ USD}}{19\,057,5\text{ USD/mes}} = 7,08\text{ meses}$$

3. FASE DE DOCENCIA

Debido a la gran importancia que actualmente posee el personal dentro de las empresas, el tema de capacitación de personal forma parte de las políticas de las empresas con el objetivo de potenciar el recurso humano con el que cuentan. Siendo Duke Energy, Guatemala a través de la planta Las Palmas II, una empresa que se interesa en el desarrollo y adiestramiento de su personal, fue posible realizar jornadas de capacitación en trabajo conjunto con el equipo de capacitación del departamento de recursos humanos de la planta.

El principal objetivo del presente capítulo es proporcionar las bases utilizadas para el desarrollo de la fase de docencia, enfocada en la realización de jornadas de capacitación dentro de las instalaciones donde se desarrolló el EPS.

3.1. Detección de necesidades

La detección de necesidades de capacitación se destaca como un estudio que mediante su implementación permite generar una idea de la situación del conjunto de conocimientos, habilidades y actitudes que poseen los trabajadores que laboran en la empresa y determinar las brechas de conocimientos, habilidades y actitudes existentes entre lo establecido, los perfiles de cada puesto y la situación real.

El objetivo de la detección de necesidades es evidenciar la diferencia entre la situación esperada en que trabaje el personal y la situación real dentro de la cual se encuentra el personal trabajando.

Al lograr obtener resultados en dicho objetivo, es posible conocer a qué trabajador y en qué temas específicos es necesario que se le capacite, calculando la prioridad y rango de alcance de la capacitación.

3.1.1. Proceso de detección de necesidades

La utilización de la detección de necesidades de capacitación implica dentro de su uso el realizar un diagnóstico que permita visualizar el estado real del personal de la empresa. Las necesidades que se observan como resultado del diagnóstico de necesidades de capacitación pueden ser del tipo evidentes y no evidentes.

Las necesidades no evidentes pueden describirse como las que se originan por deficiencias de ejecución, debido a la carencia de conocimientos, habilidades y actitudes, en los puestos que desempeñan actualmente los trabajadores y por lo tanto la capacitación que se imparta debe resolver oportunidades de mejora ya existentes. Las necesidades evidentes son aquellas cuyas causas son manifiestas sin necesidad de realizar un estudio minucioso.

La selección de temas y personal para la realización de las jornadas de capacitación necesarias a impartir fueron el resultado de un proceso de detección de necesidades de capacitación realizado por el personal de capacitación del departamento de seguridad industrial de la planta, quienes hicieron uso de las técnicas que a continuación se describen.

3.1.2. Entrevistas

Se basa en obtener información mediante una serie de preguntas dirigidas a los trabajadores y a sus jefes inmediatos. Las entrevistas a utilizar pueden ser del tipo abiertas, estructuradas y semiestructuradas. La información generada a través de las entrevistas contiene detalles sobre posibles problemas y deficiencias del trabajador con su entorno, lo que facilita la identificación de necesidades de capacitación en áreas específicas, que son necesarias para que los trabajadores desarrollen sus actividades de manera más adecuada.

3.1.3. Observación

A diferencia de la técnica de entrevista, la observación consiste en un estudio de carácter subjetivo debido a que el evaluador es quien determina, valora y compara las habilidades, conocimientos y actitudes de los trabajadores respecto de lo detallado en la descripción del puesto. La técnica de observación se puede enfocar a un estudio individual o grupal de los trabajadores. Para aplicar de manera correcta la técnica de observación es necesario estar familiarizado con las actividades desarrolladas por los empleados, además de poseer un juicio objetivo.

3.2. Planificar reuniones

El seguimiento del sistema de control de inquemados debe realizarse seguido, se aconseja que se lleven a cabo revisiones de los resultados obtenidos del control de inquemados en los quemadores de las calderas, planificándose con períodos no mayores a 30 días. Las reuniones deben ser planificadas de tal modo que los jefes del área y los supervisores encargados de la operación de extracción de cenizas estén presentes.

El objetivo de esta capacitación es dar a conocer la importancia de la reducción de inquemados, evaluar si se está cumpliendo con los objetivos propuestos, una revisión del estado actual de los equipos hasta la fecha de la revisión y propuestas de mejora al control.

3.2.1. Avance del control de inquemados

Se sugiere incluir los siguientes temas dentro del esquema de los informes parciales de las reuniones del avance del control de inquemados:

- Resumen de cambios realizados a los equipos y dispositivos de la planta Las Palmas II.
- Tabla resumen de comportamiento de los inquemados.
- Gráfica del comportamiento general de los inquemados por quemador de cada caldera.
- Cálculos de consumos teóricos y consumos reales de carbón mineral.

3.2.2. Acciones correctivas

Luego de la presentación de cada informe parcial y del análisis respectivo de los resultados parciales obtenidos, se aconseja realizar un listado de propuestas para mejoras, incluyéndose los siguientes temas:

- Cambios en los tiempos actuales de espera para el análisis de los quemadores de las calderas.
- Cambios en la apertura del aire secundario.
- Mejoras y/o cambios en los dispositivos o equipos de la planta.

3.3. Programación de capacitaciones

Las jornadas de capacitación impartidas como parte de las actividades desarrolladas dentro de este proyecto se pueden clasificar en dos tipos diferentes de capacitaciones. El primer tipo de capacitación incluyó temas sobre extracción de cenizas y análisis de inquemados que se impartió de manera conjunta con el jefe del área de capacitación de la planta. Esta capacitación estuvo dirigida a los mecánicos y soldadores especializados y de primera, y ayudantes de mecánicos.

El segundo tipo de capacitación incluyó temas de seguridad industrial que se impartió de manera conjunta con el jefe de seguridad industrial de la planta. Este segundo tipo de capacitación estuvo dirigida a todo el personal operativo que labora dentro del ingenio, incluyéndose los departamentos eléctricos, automatización, mecánicos en general y bodega de herramientas; cada capacitación realizada de este tipo tuvo una duración de 4 horas semanales.

El conjunto de capacitaciones que se realizaron estaba compuesto por temas y subtemas organizados con el objetivo de reducir o eliminar las brechas de conocimientos y habilidades identificadas en la detección de necesidades de capacitación realizada; estos temas fueron aprobados por los jefes del departamento de capacitación en asociación con los jefes de áreas.

3.4. Metodología de capacitación

La capacitación debe ser un proceso colectivo de discusión y reflexión que busque durante su desarrollo enriquecer el conocimiento individual, aumentando la confianza, la posición asertiva, el desarrollo individual y potenciar el colectivo.

La metodología utilizada en esta fase se dividió en dos etapas: primero, exposiciones interactivas y personalizadas y segundo, la práctica para los temas que aplicaron el uso de este método, permitiendo al participante relacionar los temas expuestos y aprendidos con ejemplos de la realidad de la empresa y a su desempeño cotidiano, orientando el proceso de capacitación en incrementar sus capacidades operativas de análisis e innovación, así como las destrezas técnicas requeridas para responder con éxito a los retos que plantea el desarrollo de sus actividades.

Las actividades de capacitación se realizaron en el salón auditorium ubicado en las instalaciones de la empresa, donde durante la impartición de los programas de capacitación se utilizó material didáctico escrito y audiovisual elaborado por el equipo de capacitación de la división de recursos humanos, para facilitar la adquisición de conocimientos y habilidades en el proceso de capacitación.

CONCLUSIONES

1. Se logró la reducción del porcentaje de inquemados del 12 % al 5 % en la generadora de vapor de la planta Las Palmas II, propiedad de Duke Energy, Guatemala.
2. Se logró reducir la cantidad de costo de combustible utilizado para la generación de llama dentro del horno del generador de vapor y de esta manera la empresa tendrá mayores ganancias.
3. La mezcla pobre demora la combustión y la entrega de calor, ocasionando una reducción del calor absorbido por las paredes. Menor absorción de calor en las paredes, genera mayores temperaturas de los gases saliendo del hogar. Esto a su vez obliga a incrementar el flujo de agua de atemperado, haciendo la caldera menos eficiente. Por lo que se equilibró la mezcla de aire/combustible en cada uno de los quemadores.
4. Se logró la reducción de las velocidades del aire primario, porque estas excesivas velocidades, al salir de los quemadores, impiden la mezcla eficiente entre aire primario y secundario. Por lo que dentro del horno, la llama se alarga en la forma de un cigarro, a veces rotando sobre sí misma, con baja estabilidad y puntos esporádicos de ignición formándose lejos de la boca del quemador. También por efecto de la mezcla pobre se presentan distribuciones no uniformes de dióxido y de temperaturas a la salida del hogar.

5. Las mejoras que se identificaron para lograr reducir los inquemados de un 12 % a 5 % son la regulación de aires en cada quemador, la eliminación de diamantes en tuberías del aire primario y la incorporación de anillos eliminadores de *roping* dentro de cada quemador.

RECOMENDACIONES

1. Para que el sistema de control de inquemados funcione adecuadamente es necesario entender su fin supremo, que es la mejora del uso de carbón mineral como combustible en los quemadores, por lo que es necesario que todo el personal relacionado directa o indirectamente con dichos servicios, entienda y forme parte activa en el programa, con el fin de mejorar dichos sistemas, por lo que el sistema de monitoreo debe ser participativo e incluyente.
2. A los operarios encargados del cuarto de control de las calderas, informar constantemente de los porcentajes de inquemados existentes en cada uno de los quemadores, con el fin de controlar el gasto de carbón sobre las actividades de los mismos.
3. Controlar periódicamente que los aires primarios no excedan 4 500 pies/min.
4. Para realizar una inversión en modificaciones o cambio de quemadores será necesario evaluar la relación costo-beneficio al mejorar la eficiencia térmica como resultado de esa inversión. Esta evaluación requiere fijar como punto de partida los parámetros de operación iniciales, es decir, después de corregir los problemas evidenciados.

BIBLIOGRAFÍA

1. AXPUC 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. *Termodinámica*. 7a ed. Nueva York: McGraw-Hill, 2011. 956 p. ISBN 978-0-07-352932-5.
3. *Cost and performance baseline for fossil energy plants*. Estados Unidos: Departamento de Energía: National Energy Technology Laboratory, 2010. 600 p.
4. ESCAMILLA CÓBAR, Manuel Alberto. *Análisis energético integral de ingenio Santa Teresa, S. A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 338 p.
5. GONZÁLEZ, Jaime. Informe de evaluación de inquemados. Informe inédito. Guatemala, Valvexport, Inc., 2014. 61 p.
6. HICKS, Jim. Fuel switching feasibility study for firing specified Columbian coals. Informe inédito. Estados Unidos, Babcock & Wilcox Power Generation Group, Inc., 2008. 19 p.

7. LEZANA CHAJÓN, Luis Alberto. *Análisis de operación y funcionamiento de un clarificador de agua, oriunda de lavado de gases en calderas de ingenio La Unión, S. A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 133 p.
8. The Babcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use.* Kitto, 41a ed. Ohio: McDermott, 2005. 1200 p. ISBN 0-9634570-1-2.
9. VALLE GÓMEZ, Jorge Joel. *Indicadores logísticos para el mejoramiento del sistema de transporte de azúcar refinada en contenedores para un ingenio azucarero.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 184 p.

APÉNDICES

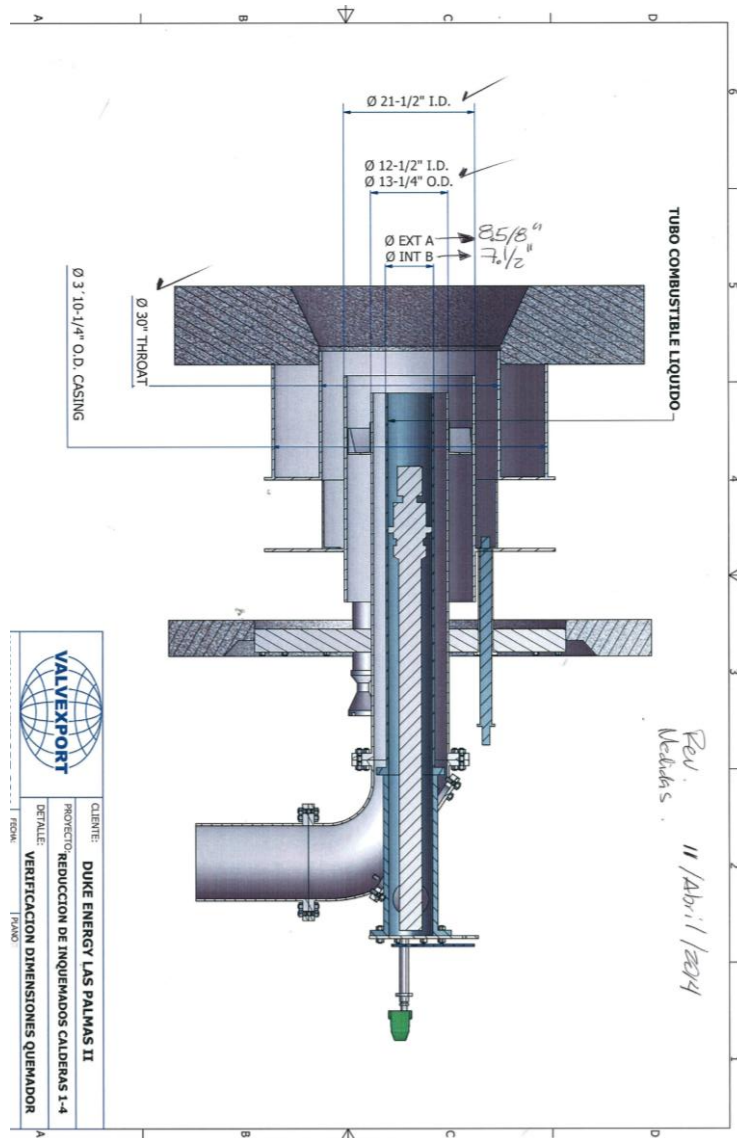
Apéndice 1. **Extractor de flujo de cenizas**



Fuente: planta Las Palmas II, Duke Energy, Guatemala.

ANEXOS

Anexo 1. Plano del tipo de quemador utilizado en las calderas 1 – 4 para el proyecto de reducción de inquemados



Fuente: Valvexport, Inc.

