

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



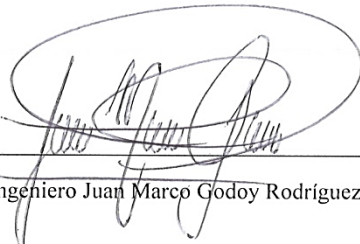
INCREMENTO DE EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE  
CARBÓN PULVERIZADO PARA UNA PLANTA DE  
GENERACIÓN DE ENERGÍA

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Brandon Estuardo Díaz Vásquez  
para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería en  
Tecnología Industrial

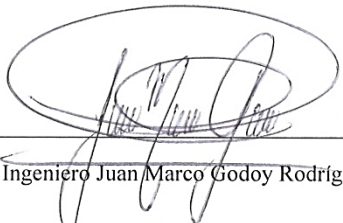
Guatemala

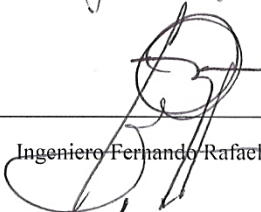
2018

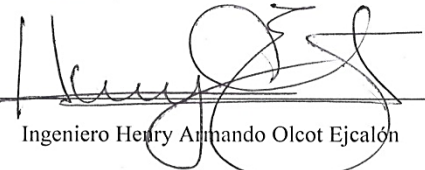
Vo. Bo.:

(f)   
Ingeniero Juan Marco Godoy Rodríguez

Tribunal Examinador:

(f)   
Ingeniero Juan Marco Godoy Rodríguez

(f)   
Ingeniero Fernando Rafael Rivera Turcios

(f)   
Ingeniero Henry Amando Olcot Ejcalón

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de enero 2018.

## AGRADECIMIENTO

A Dios

Ser maravilloso que me dio fuerza y fé para creer lo que me parecía imposible terminar.

A mis padres

Maribel Vásquez Melgar

Esaú Díaz

Por su amor y apoyo incondicional

A mis hermanas

Karen Yesenia y Lesly Maribel

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II.OBJETIVOS .....	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO .....	4
A. Manejo de combustible .....	4
B. Molinos Pulverizadores.....	6
C. Combustión.....	9
D. Sistema de combustión del carbón pulverizado.....	11
E. Quemadores convencionales para carbón pulverizado .....	15
F. Calderas.....	16
V. METODOLOGÍA.....	18
VI. RESULTADOS.....	35
VII. ANALISIS DE RESULTADOS.....	44
VIII. CONCLUSIONES.....	47
IX. RECOMENDACIONES.....	48
X. BIBLIOGRAFÍA.....	49
XI. ANEXOS.....	50
XII. GLOSARIO.....	51

## LISTA DE TABLAS

1. Principales características del carbón mineral.....	6
2. Pruebas previas a la modificación.....	28
3. Pruebas posteriores a la modificación.....	28
4. Comprobación de báscula .....	35
5. 1er resultado balance aire limpio.....	35
6. Resultado con eficiencia balance aire limpio.....	36
7. 1er resultado, tubo 1 balance aire sucio.....	36
8. 2do resultado, tubo 2 balance aire sucio.....	37
9. 3er resultado, tubo 3 balance aire sucio.....	37
10. 4to resultado, tubo 4 balance aire sucio.....	38
11. Desviaciones del flujo de aire +/- 5%.....	38
12. Desviaciones del flujo de carbón +/-10% .....	38
13. Eficiencia tubo 1, balance aire sucio.....	39
14. Eficiencia tubo 2, balance aire sucio.....	39
15. Eficiencia tubo 3, balance aire sucio.....	40
16. Eficiencia tubo 4, balance aire sucio.....	40
17. Desviaciones eficientes del flujo de aire +/- 5% .....	41
18. Desviaciones eficientes del flujo de carbón +/-10% .....	41
19. Muestra fineza de carbón .....	41
20. Muestra eficiente fineza de carbón.....	42
21. Análisis de gases HVT.....	43
22. Ahorro financiero.....	44
23. Reducción total de Btu .....	45

## LISTA DE FIGURAS

1. Distribución mundial de las reservas de carbón .....	4
2. Carbón mineral.....	5
3. Banda alimentadora gravimétrica.....	7
4. Molino de rodillos .....	8
5. Molino de martillos.....	8
6. Molino de bolas.....	9
7. Combustión de una partícula de carbón .....	10
8. Llama primaria óptima.....	14
9. Alta llama primaria.....	14
10. Quemador tipo S y componentes .....	16
11. Detalle caldera Acuotubular.....	16
12. Detalle caldera Piro-tubular.....	17
13. Orificios típicos de la línea de carbón .....	21
14. Distribución de partículas de carbón en la salida del extractor .....	23
15. Proceso muestra fineza del carbón.....	26
16. Sonda de aire sucio.....	27
17. Mejora en el balance del combustible con las paletas extendidas del clasificador.....	28
18. Clasificadores angulares tipo cuchillas.....	29
19. Extensión del faldón de salida del clasificador .....	30
20. Circulación del carbón a través de un clasificador del molino .....	30
21. Velocidades apropiadas de la garganta del pulverizador.....	31
22. Circulación del carbón a través de un clasificador de molino.....	32
23. Acondicionador de muestreo de gas.....	33
24. Sonda HVT.....	34
25. Eficiencia del sistema de carbón pulverizado .....	46

## RESUMEN

El trabajo de tesis está constituido de varios capítulos dando inicio con el marco teórico, en él se describe el manejo de combustible que es el carbón mineral, dando a conocer detalles en las tecnologías que aplican en Guatemala para el transporte de carbón. Luego se hace mención de los tipos de molinos pulverizadores, como se da el proceso de la combustión, cuales son los elementos de la combustión, se analiza el sistema de combustión del carbón pulverizado. Se finaliza el marco teórico describiendo los tipos y componentes de las calderas.

En la metodología se realizó una guía ordenada de pasos y mediciones técnicas a seguir, para eficientar un sistema de combustión que emplea como fuente principal carbón mineral pulverizado, para aplicarlos cuando se requiera disminuir el costo de la producción de energía a partir de la disminución de la utilización de carbón pulverizado para producir energía eléctrica. Se obtuvo modificaciones y mediciones que establecieron un cambio significativo en el sistema de carbón pulverizado, dentro de este sistema se encuentra la báscula estática donde se pesa el carbón mineral, los balances de aire limpio y aire sucio, el procedimiento de tamizado del carbón pulverizado y el análisis muestreo de gases que es una parte muy importante para la mejora y eficiencia de la combustión. El gas de combustión se muestra en varios lugares a lo largo de la caldera, utilizando la sonda de alta velocidad HVT. Esta guía tiene el propósito de llevar un razonamiento metódico para obtener resultados trazables y comprobables que si se logra una mejor eficiencia en este sistema.

Los resultados del estudio fueron satisfactorios, obteniendo un sistema de carbón pulverizado eficiente, se agregan tablas con estadísticas reales del antes y después de la eficiencia de la planta. El objetivo principal era reducir 100btu/Kw, sin hacer las calibraciones correspondientes en la planta indicaban que tenía un consumo de 12,231.80 Btu/Kw con las mejoras realizadas la planta generadora de energía hizo una comparación dando como resultado un consumo de 10,150.25 Btu/Kw, teniendo como resultado final una reducción de 2,081.55 Btu/Kw logrando una excelente eficiencia en el sistema de carbón pulverizado.

## I. INTRODUCCIÓN

Debido a la gran competencia entre las plantas térmicas por colocar bloques de energía y potencia en el mercado guatemalteco los ingenieros se han visto en la necesidad de eficientar el funcionamiento de sus plantas de generación para hacer que sus precios sean competitivos. La manera de lograr esto es eficientar sus principales procesos y como se observará en el desarrollo de esta tesis el pulverizado del carbón es una de las principales incidencias en la eficiencia de una caldera que quema carbón.

La planta donde se desarrolló el estudio, es una planta generadora de energía, en la cual no se ha realizado ningún estudio para la mejora en el sistema de carbón pulverizado, este proceso es el más importante en la planta generadora ya que en este sistema es donde el carbón mineral es pesado con básculas, pulverizado y quemado para su uso como combustible.

Para lograr un estudio adecuado del comportamiento de la planta fue necesario hacer mediciones iniciales, como consumo de carbón, eficiencia de caldera y el estado en que se encuentra con el propósito de hacer planteamiento de mejoras en el proceso de pulverizado del carbón.

Durante el desarrollo de la tesis se dan a conocer los diversos tipos de carbón, su poder calorífico, los diferentes tipos de pulverizadores, que ventajas y desventajas hay en cada tecnología. Se exponen las principales variables que afectan la combustión como la cantidad de aire limpio, sucio, el proceso de combustión, los tipos de calderas.

## II. OBJETIVOS

### A. GENERAL

Disminuir como mínimo 100 BTU la energía térmica empleada para producir 1 KW de energía eléctrica de una planta ubicada en la costa sur de Guatemala haciendo más eficiente el sistema de combustión de carbón pulverizado.

### B. ESPECÍFICOS

- Determinar la capacidad del molino de carbón pulverizado dependiendo el tipo de carbón mineral comercialmente utilizado en Guatemala.
- Determinar cuánto dinero representa una disminución de 100BTU de energía térmica para generar la misma cantidad de energía eléctrica para cumplir el contrato de la empresa.
- Diseñar procedimientos prácticos, mediciones y cambios que se pueden realizar para hacer más eficiente un sistema de carbón pulverizado.

### III. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto fue desarrollado en una planta generadora de energía situada en la costa sur de Guatemala, estará enfocada específicamente en el sistema de carbón pulverizado, al implementar las mejoras en este sistema que aquí se detallarán se verán beneficiados los siguientes aspectos en la planta generadora de energía, siendo estos cinco los pasos que conforman este sistema, comprobación de báscula, sistema de aire limpio, sistema de aire sucio, fineza de carbón y el HVT.

Las plantas térmicas que utilizan carbón mineral como su principal combustible para generar energía eléctrica, sirven de base para mantener la estabilidad y garantizar la confiabilidad del sistema interconectado del país, estas plantas representan un 35% de la demanda máxima de energía de Guatemala durante casi todo el año, pero debido a la adición de tecnologías más rentables y nuevas para producir energía eléctrica, es cada vez más difícil para estas plantas tener un margen amplio de ganancias durante la operación.

Con este trabajo se expondrán las variables que afectan la eficiencia de una caldera y por ende la cantidad de combustible necesario para producir una cantidad determinada de energía, se observa el funcionamiento de pulverizadores de bolas y de martillos, los tipos de calderas y como afecta la combustión. Al hacer varias mediciones de los gases en distintos puntos de las calderas y determinar varios valores como la cantidad de oxígeno, NOx, se obtiene la retroalimentación a la cantidad de aire de combustión y a la fineza de molienda en los pulverizadores.

En cuanto al incremento de eficiencia, este proyecto propone realizar diversas modificaciones, instalaciones y mediciones para hacer más eficiente la planta generadora, al realizar esta eficiencia se producirán ahorros sustanciales en el combustible y también ahorro financiero a nivel general.

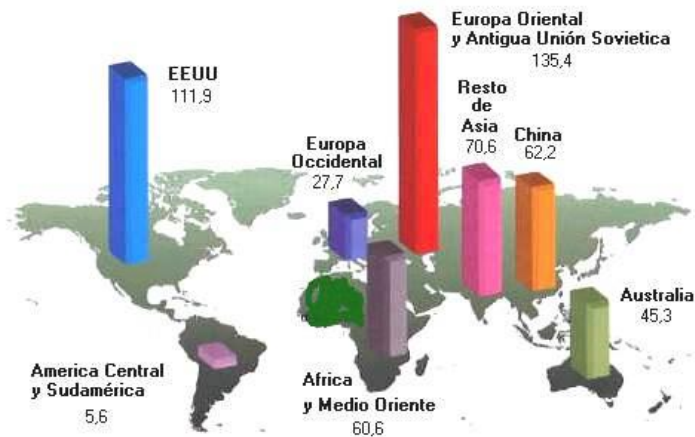
#### IV. MARCO TEÓRICO

##### A. Manejo de combustible (carbón mineral)

De los combustibles fósiles existentes, el carbón mineral es el más abundante en el mundo, siendo sus reservas probadas aproximadamente cinco veces las de petróleo y cuatro veces las de petróleo y gas juntas. No solamente existen grandes reservas, sino que también están geográficamente esparcidas en más de 100 países en todos los continentes. La abundancia de las reservas constituye una disponibilidad de suministro durante mucho tiempo. A los actuales niveles de producción, las reservas de carbón son suficientes para los próximos 250 años.

Actualmente, más de la mitad de la producción mundial de carbón suministra el 37% de la electricidad mundial. Existen muchos países que son altamente dependientes del carbón para su electricidad: Polonia 97%, Sudáfrica 93%, Australia 85%, China (80%), India 75%, República Checa 74%, Grecia 71%, Dinamarca 67% y EEUU 57%.

*Figura 1: Distribución mundial de las reservas de carbón.*



El carbón mineral es el combustible fósil más abundante en el mundo, es un material estable y no presenta los problemas de fugas y derrames asociados a otros combustibles.

*Figura 2: Carbón mineral*



1. Tipos de carbón. Los tipos de carbón en general se basan por rango o categoría, los cuales son los siguientes:

- Turba: El color de este carbón va de un amarillento a un color negro, tiene un bajo contenido de carbono entre 50% y 60%, un poder calorífico inferior a 8.4 MJ/kg y un alto índice de humedad, por lo que no es recomendable utilizarlo como combustible.
- Lignito: Es un tipo de carbón de calidad intermedia entre el carbón de turba y el bituminoso, tiene un contenido de carbono de 55% y 65%. Tiene un color negro pardo y una estructura fibrosa o leñosa, tiene una capacidad calorífica de 17.2 MJ/kg. Tiene un alto contenido de materia volátil que provoca la desintegración del lignito expuesto al aire.
- Bituminoso: Tiene un contenido de carbono entre 60% y 80% por lo que su poder calorífico es superior, es de color negra mate, arde con dificultad con una llama amarillenta, su poder calorífico es de 30 MJ/kg y es recomendable para utilizarlo como combustible.
- Antracita: Es el mejor de los carbones, es de alto poder calorífico 34 MJ/kg. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina, tiene un contenido de carbono de 75% a 95% y es muy poco contaminante.

*Tabla 1: Principales características del carbón mineral*

TIPOS DE CARBÓN	COLOR	CONTENIDO DE CARBONO (%)	PODER CALORÍFICO (kJ/kg)
Turba	Pardo amarillento a negro	50 - 60	8.400
Lignito	Negro pardo	55 - 65	17.200
Bituminoso	Negro	60 - 80	30.000
Antracita	Negro brillante	75 - 95	34.000

a. Energía específica del carbón. Esta energía representa la cantidad de calor que se libera en combustión completa por cada unidad de material quemado, la energía específica del carbón también se conoce como poder calorífico o energía térmica, el poder calorífico es una propiedad entre los carbones la cual es importante en los requisitos de equipo para manejo y pulverización, así también para su almacenamiento.

#### B. Molinos pulverizadores

La finalidad del proceso de molienda es pulverizar el carbón mineral aumentando su eficiencia energética debido al incremento de área por unidad de volumen y a la deshidratación lograda durante el proceso. Luego de ser pulverizado, el polvo del carbón es llevado fuera del molino a través de un sistema de transporte neumático con un ventilador eso es el aire primario junto con el carbón pulverizado y eso se transporta directo al quemador, ese polvo no se puede almacenar porque es muy volátil e inflamable, por eso se mete directo a la caldera por medio de los quemadores de carbón pulverizado.

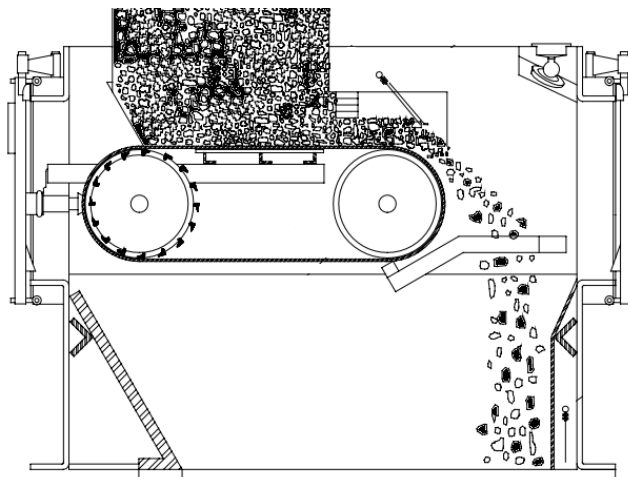
##### 1. Sistema de alimentación al molino.

a. Alimentador volumétrico. Los alimentadores de carbón diseñados para proporcionar una tasa de volumen controlada de carbón al pulverizador. Estos alimentadores de tipo no compensan los cambios en la densidad aparente del carbón, lo que resulta en variaciones en la entrada de energía al pulverizador y eventualmente a los quemadores. Los ejemplos típicos son los alimentadores de arrastre, mesa, de bolsillo y correa.

b. Alimentadores gravimétricos. Alimentadores de carbón diseñados para compensar variaciones en la densidad aparente debido a la humedad, el tamaño del carbón y otros factores. Estos alimentadores

monitorean el peso del carbón en un cinturón y envían una señal de retroalimentación. Esta señal se utiliza para mantener el flujo de peso ajustando la altura de una barra niveladora o ajustando la velocidad de la correa. Estos alimentadores proporcionan un índice de flujo de peso más preciso de carbón a los pulverizadores.

*Figura 3: Banda alimentadora gravimétrica.*

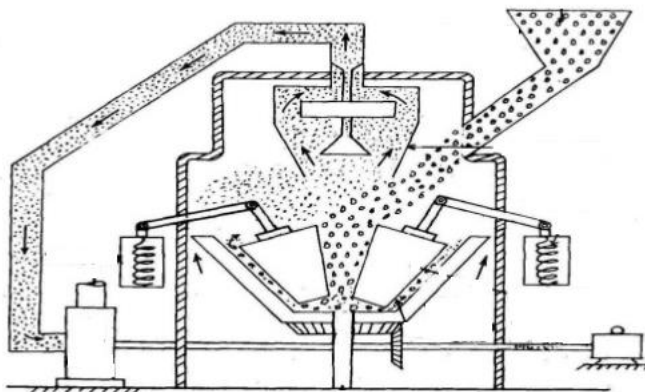


## 2. Tipos de molinos para carbón mineral

a. Molino de rodillos. Los molinos de rodillos son utilizados para la trituración primaria y secundaria del carbón. La superficie del rodillo puede ser lisa, corrugada o dentada dependiendo de la aplicación, los rodillos lisos tienden a desgastarse formando arrugas de forma anular que interfieren con la trituración de las partículas, aunque algunos diseños cuentan con mecanismos que mueven el rodillo de un lado a otro para que el desgaste sea uniforme. Los rodillos corrugados proporcionan un mejor agarre sobre la alimentación, pero el desgaste sigue constituyendo un problema grave. Los rodillos dentados se emplean frecuentemente para la trituración de carbón.

Las plantas de molienda con molinos de rodillos utilizan menos espacio y tienen un menor consumo específico de energía, se puede ahorrar entre un 15 y un 25% de energía en toda la planta. Los molinos de rodillos son más flexibles, estos pueden fácilmente ajustarse a entradas de material con un rango aproximado de 40 a 100% de la capacidad nominal.

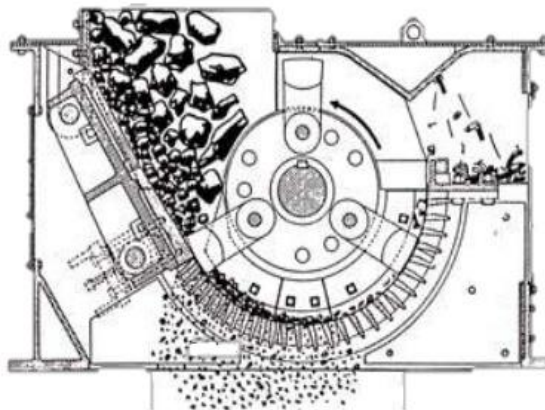
*Figura 4: Molino de rodillos*



b. Molino de martillos. El material que entra en el molino es golpeado por un conjunto de martillos girando a baja velocidad. De esta manera, se produce una primera rotura por impacto. Estos martillos lanzan el material contra el interior del molino, donde se encuentran una serie de placas de impacto, donde el material se rompe por segunda vez por impacto. Este proceso se repite mientras el material se mantiene en el interior del molino. Cuando es necesario, se equipa al molino con una serie de parrillas o cribas que determinarán el tamaño máximo de la partícula una vez molida. En el paso a través de las parrillas se produce una última rotura por cizalladura.

Las parrillas o cribas se pueden extraer fácilmente del cuerpo del molino. El modo en cómo se sacan, permite la rápida descarga del triturador en caso de atascamiento por corte del fluido eléctrico o parada anormal de la instalación.

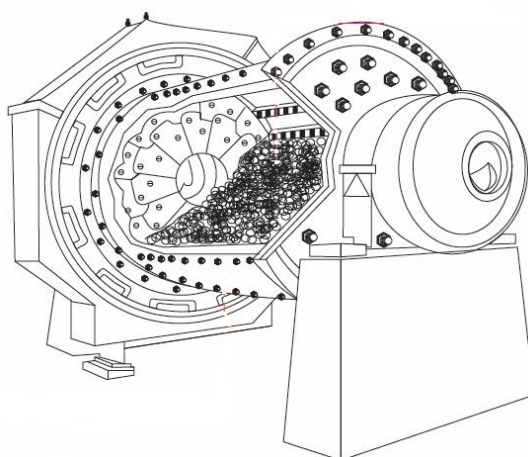
*Figura 5: Molino de martillos*



c. Molino de bolas. El carbón bruto procedente de uno o varios alimentadores, cae en el alojamiento de dos sinfines situados en los extremos del molino y arrollados sobre estructuras tubulares huecas, que tienen el mismo eje que el cilindro y un diámetro bastante inferior. Al girar el molino, el sinfín introduce el carbón en el interior del tambor cargado con las bolas.

El carbón se pulveriza por fricción debido a los deslizamientos en el movimiento de la carga de bolas, por impacto al ascender la carga de bolas y caer dentro del molino y por presión de las bolas sobre el carbón que quede hacia el interior de la carga.

*Figura 6: Molino de bolas*



### C. Combustión

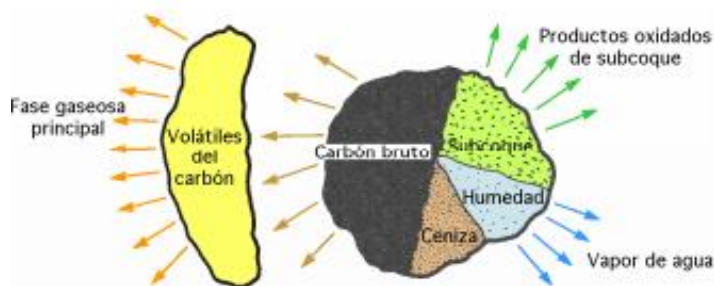
Cuando una partícula de carbón entra en el horno de la caldera también conocido como hogar, su temperatura superficial aumenta debido a la transferencia de calor por radiación y convección, desde los dos tipos de fuentes:

- Gases (humos) del hogar
- Otras partículas que se encuentran en combustión

Conforme aumenta la temperatura de la partícula, la humedad de la misma vaporiza y las materias volátiles se desprenden, inflaman (ignicionan) y queman casi inmediatamente, aumentando la temperatura de la partícula residual, identificada normalmente como subcoque (char), que se consume a alta temperatura, dejando como residuo el contenido en ceniza y una pequeña parte de carbono no quemado (inquemado).

Las materias volátiles, el carbono fijo (precursor del subcoque), la humedad y el contenido en ceniza del combustible, se cuantifican como porcentajes en peso, que configuran el denominado análisis inmediato.

*Figura 7: Combustión de una partícula de carbón*



1. Contenido en materias volátiles. Las materias volátiles son elementos críticos para la estabilidad de la llama y para acelerar la combustión del subcoque. Los carbones que tienen un mínimo de materias volátiles, como las antracitas y los bituminosos bajos en volátiles, son difíciles de encender y requieren sistemas de combustión de diseño especial. La cantidad de materias volátiles desprendidas de una partícula de carbón, depende de una serie de parámetros como su composición, temperatura a la que se expone y tiempo de exposición.

Al aumentar la temperatura, manteniendo invariables los demás parámetros, se incrementa la producción de materias volátiles desprendidas del carbón. Los carbones que tienen altos contenidos en materias volátiles facilitan un control más efectivo en la emisión de NOx mediante los adecuados métodos de combustión. La ignición de un carbón depende de la calidad y cantidad de materias volátiles que contenga.

Las materias volátiles de carbones bituminosos y de carbones de alto rango son ricas en hidrocarburos y tienen elevados poderes caloríficos que, por unidad de masa, pueden llegar al doble del que corresponde a los carbones de bajo rango. Las materias volátiles de carbones de bajo rango incluyen grandes cantidades de CO y de humedad procedente de la descomposición térmica en consecuencia, los poderes caloríficos de los carbones de bajo rango son reducidos.

2. Efecto en contenido en humedad. El contenido en humedad que tiene el carbón influye en las características funcionales del proceso de combustión. En los sistemas de combustión directa del carbón pulverizado, toda la humedad del combustible se transporta hacia los quemadores esta humedad dificulta la ignición del carbón, ya que el agua tiende a evaporarse y sobrecalentarse durante el desprendimiento de las materias volátiles de las partículas, por lo que las moléculas de agua se disocian y se absorbe más energía adicional a temperaturas elevadas.

Son normales humedades del:

- 15% en carbones bituminosos altos en volátiles
- 30% en el caso de los sub-bituminosos
- 40% o más para algunos lignitos

Los contenidos en humedad superiores al 40% sobrepasan las posibilidades reales de ignición que tienen los sistemas convencionales de combustión del carbón pulverizado, en estos casos se precisan sistemas alternativos, que sean capaces de reforzar el secado durante la preparación del combustible o poder separar al menos una parte de la humedad evaporada que va a quemadores.

3. Efecto del contenido en materia mineral. La materia mineral o ceniza resultante de la combustión del carbón es inerte y minora el poder calorífico del combustible, por lo que cuando la ceniza aumenta, se requiere más peso de carbón para alcanzar un determinado nivel de aporte de calor neto en el hogar de la caldera o generador de vapor. La ceniza absorbe calor al tiempo que interfiere la transferencia de calor por radiación hacia las partículas de carbón, por lo que dificulta el proceso de combustión, especialmente en el caso de carbones con alta ceniza.

El comportamiento de la materia mineral determina la tendencia a la escoriación de la ceniza del carbón y condiciona la combustión, al influir de forma notable en:

- La disposición del conjunto quemadores
- Las temperaturas de llama resultantes
- El tiempo de residencia correspondiente

#### D. Sistema de combustión del carbón pulverizado

Las emisiones de NOx en calderas de carbón pulverizado se están gestionando cada vez más mediante el uso de tecnologías de tratamiento de gases de combustión. Sin embargo, existen oportunidades para la gestión de NOx mediante la optimización de los parámetros laterales de la caldera o "combustión". La combustión optimizada incluye el control y la gestión del flujo de aire secundario, equilibrando el flujo primario de combustible a los quemadores, la afinación de los quemadores y las inclinaciones de los quemadores (calderas tangenciales) y el rendimiento del pulverizador. La gestión de las entradas de combustión debe ser el primer paso hacia la reducción de NOx

1. Flujo de aire primario. Transporta el carbón pulverizado directamente desde el pulverizador hasta los quemadores, a un régimen de velocidad que fija el correspondiente control de combustión conforme a los requisitos de la demanda. Este aire entra al pulverizador entre 400 a 600 °F, después de pasar quitándole humedad al carbón, mezcla de aire primario y carbón pulverizado que sale del molino pulverizador, aproximadamente ente 150 a 180 °F.

Los aumentos en el flujo de aire primario se correlacionan con un aumento de las velocidades en la salida del clasificador del pulverizador.

Un aire de mayor velocidad en la salida del clasificador tiene suficiente energía para atrapar partículas de carbón más grandes y masivas, lo que da como resultado una mala fineza del carbón. Las velocidades más bajas permiten que las partículas más grandes sean devueltas a la zona de molienda del pulverizador. El flujo de aire primario elevado también aumenta la diferencia de velocidad entre el aire primario y el secundario (combustión). Esto retrasa la combustión, permitiendo que un gran porcentaje de calor sea liberado por encima de la zona de la banda del quemador en lugar de ser absorbido por las paredes inferiores del agua. Este alto lanzamiento de calor eleva la temperatura del gas de salida del horno que aumenta la propensión de escoria.

a. Cálculos de flujo de aire del tubo de aire, gas y carbón. Se encuentran las siguientes variables:

- Presión estática, Sp (pulgadas de columna de agua)
- Temperatura de la tubería, Tp (F)
- Presiones de velocidad, vh<sub>1</sub>, vh<sub>2</sub>, etc. (generalmente de 24 puntos)
- Área de tubería, A (ft<sup>2</sup>)
- Presión barométrica, Bp (Pulgadas de Hg)
- Factor “K” de la sonda.

1. Calcular la media de la velocidad de la raíz cuadrada ( $avg \sqrt{Vh}$ )

$$avg \sqrt{vh} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{vh}}{n} = \frac{\sqrt{vh_1} + \sqrt{vh_2} + \dots + \sqrt{vh_n}}{n}$$

2. Calcular la densidad,  $\rho$  (lb/ft<sup>3</sup>):

$$\rho = 0.075 \frac{(70 + 460)}{(Tp + 460)} \frac{(\frac{Sp}{13.6} + Bp)}{29.92}$$

Densidad estándar = 0.075 Lb/ft<sup>3</sup>. Densidad del aire en 70° y 29,92” Hg

## 3. Cálculo de velocidad de un tubo pitot estándar

$$V = 1096 * K * \frac{Avg \sqrt{Vh}}{\sqrt{\rho}}$$

## 4. Flujo volumétrico, Q (cfm)

$$Q = (A) (V)$$

## 5. Flujo de masa, m (Lb/hr)

$$m = (Q) (\rho) (60)$$

Después de la determinación del balance de aire limpio de la línea de combustible, se evalúa la instalación de orificios. El balance deseado de aire limpio requiere de 2%, requiere datos entre los dos equipos separados para estar dentro de 1% antes de hacer cualquier cambio en el orificio. Las líneas de combustible son orificios que por un proceso iterativo utilizando orificios de prueba. Después de configurar el orificio óptimo, se determinan los orificios permanentes y se instalan.

2. Flujo de aire secundario. Este aire envuelve la llama principal de los quemadores, este sirve para disminuir las formaciones de NOx. Su función principal es lograr aportar oxígeno adicional para lograr una combustión completa dependiendo de la cantidad de combustible. Este aire se suministra por los ventiladores de tiro forzado y se precalienta entre 350 a 600 °F dependiendo del diseño de la planta.

Las variables mecánicas, de mantenimiento o de funcionamiento comunes que causan los desequilibrios secundarios del aire del quemador son:

- Configuración de registro de aire
- Indicación externa no representativa del mango del quemador, la cubierta o la posición del registro.
- Aerodinámica de la caja de viento
- Amortiguador de la caja del viento o funcionamiento defectuoso del actuador
- Caja de viento/fugas de carcasa
- Distribución no óptima de sobre fuego, límite o aire de cortina.

### 3. Beneficios de la medición del flujo de aire

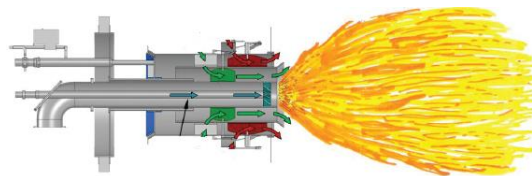
#### a. Medioambiente

- Reduce el  $\text{NO}_x$
- Mejor rendimiento del precipitador
- Mejora la calidad de la ceniza
- Reduce el  $\text{CO}_2$

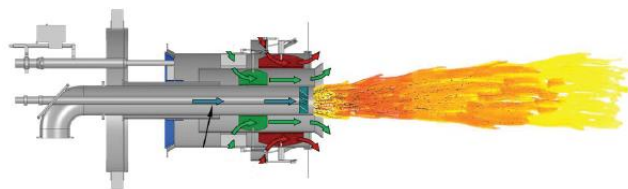
#### b. Financiero

- Mejoras en la eficiencia (Temperaturas óptimas de vapor)
- Mejor confianza en la planta
- Menos escorias
- Menos sucio
- Alta capacidad de fuego con un costo bajo en combustible

*Figura 8: Llama primaria óptima*



*Figura 9: Alta llama primaria*



4. Principios fundamentales del quemador. Los quemadores constituyen los elementos centrales del diseño de sistemas de combustión, estos incorporan:

- El control de la combustión
- El diseño del hogar
- La preparación del combustible
- La distribución de la mezcla aire + combustible

#### E. Quemadores convencionales para carbón pulverizado

1. Quemador convencional circular. El quemador circular se compone de una tobera a la que se suministra el flujo de aire primario y carbón pulverizado, que viene de un difusor en su extremo para dispersar el carbón hacia el flujo de aire secundario, que entra en el recinto del quemador a través de un cortavientos, que consiste en un conjunto de paletas dispuestas en configuración circular, entre dos placas.

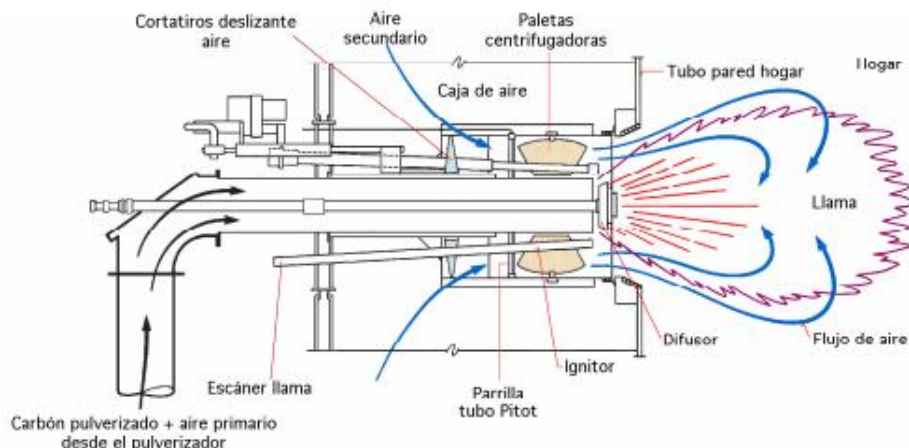
Cuando el quemador está fuera de servicio estas paletas se cierran sólo hasta la posición de refrigeración, para el encendido del quemador se abren parcialmente hasta la posición de ignición y llegan a la abertura total con el funcionamiento nominal del quemador.

En el quemador circular se pueden quemar gas natural, aceite y carbón pulverizado pero no se recomienda el uso simultáneo de combustibles distintos de un mismo recinto quemador, debido a un posible exceso de fuego.

2. Quemador alveolar. Este quemador combina dos o tres quemadores circulares dispuestos como un conjunto en una disposición vertical que funciona como una sola unidad.

3. Quemador tipo S. Este tipo de quemador conserva las principales características funcionales del quemador circular, pero cuenta con una configuración, la garganta o tobera del quemador es prácticamente la misma que la del quemador circular pero el flujo de aire secundario y el torbellino que se induce al flujo de aire se controla por separado. El quemador tipo S permite una mayor eficiencia de la combustión y más fiabilidad mecánica que el quemador circular convencional, siendo muy sencilla su sustitución por otro quemador de reserva.

*Figura 10: Quemador tipo S y componentes*

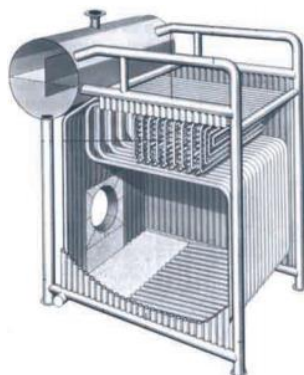


## F. Calderas

1. Clasificación. Las calderas se clasifican según el paso del fluido del calor a través de los tubos de intercambio.

a. Calderas acuotubulares. En estas calderas durante su calentamiento tienen un bajo volumen de agua por lo que pueden ser calificadas como de primera clase, son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22 bares. Estas son las calderas comúnmente utilizadas para centrales generadoras de energía y que también por lo general son de alto flujo de vapor en comparación de las pirotubulares.

*Figura 11: Detalle caldera Acuotubular*



b. Calderas pirotubulares. Estas son calderas en las que tienen un gran volumen de agua, este volumen les permite adaptarse mejor a las variaciones de la instalación que las calderas acuotubulares. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bares.

*Figura 12: Detalle caldera Pirotubular*



## V. METODOLOGÍA

### A. Incremento de eficiencia de un sistema de carbón pulverizado.

Para realizar este estudio de eficientar el sistema de carbón pulverizado de la planta generadora ubicada en la costa Sur de Guatemala, se solicitó apoyo al departamento de operación de dicha planta y en conjunto se realizaron mediciones y modificaciones los cuales los resultados fueron satisfactorios.

Fueron cinco pasos los que incrementaron la eficiencia del sistema de carbón pulverizado las cuales son las siguientes:

1. Comprobación de báscula. Ingresar un camión con carbón a la báscula estática se obtiene el peso neto después de tarar el camión, después el carbón es transportado por los conductores de carbón hacia el silo, pasando por la báscula dinámica, después se toma el peso medido por la báscula dinámica y se obtiene el % de error el cual debe ser a 1%.

Si el % de error es mayor al 1% se debe calibrar la báscula dinámica utilizando un peso patrón certificado y con personal capacitado para realizar dicho procedimiento.

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Peso báscula estática} - \text{Peso Báscula Dinámica}}{\text{Peso Báscula Estática}} * 100$$

2. Balance de aire limpio. Balance de resistencia del sistema de las líneas del combustible de aire limpio es la primera fase integral del combustible y el programa de balance del aire. Es importante recordar que balancear el aire limpio es un factor en optimizar el balance de combustible y de aire del pulverizador. Sin embargo, es sólo uno de los muchos parámetros que deben de tratarse. El balance de combustible óptimo se logra a través de un esfuerzo combinado para mejorar eficacia de pulido del pulverizador (mayor fineza).

a. Se realiza el balanceo de aire a través de:

- Establecer la resistencia del sistema para cada línea de carbón sobre una base de flujo de aire balanceado. Se logra colocando una placa de orificio ajustable en cada línea del quemador.
- Proporcionar una correlación entre el aire sucio de la línea de combustible y velocidad del aire limpio.
- El balanceo de aire limpio es una parte integral de aire de línea de combustible para equilibrar la proporción del combustible que incorpora el aire así como el balanceo del combustible.
- Para asegurar el mínimo de combustible la velocidad de línea se mantiene después de la optimización de flujo del aire primario para mejorar la estabilidad de la llama con cargas más bajas y reducir paros de línea del combustible.

b. Pasos para realizar la prueba de aire limpio

- 1) Instalar válvulas de prueba de la línea de carbón para facilitar la inserción de tubos pitot. La idea principal es que las válvulas de prueba de la línea de carbón deben estar ubicados en una carrera vertical de la tubería de entre 5 y 10 diámetros debajo de la construcción más cercana, dos puertos de prueba 90° aparte, por la tubería requerida.
- 2) Realizar puntos en el tubo pitot que están marcados de igual área de acuerdo del código de prueba del rendimiento para atravesar los conductos circulares.
- 3) Dos secciones iguales de tubería clara se cortan a la longitud deseada. El tubo es luego acoplado con cinta y un tubo está marcado en ambos extremos para identificarla como la línea "total" o "alta presión". El tubo restante, que no está marcado, se identifica como la línea de "baja presión" o "estática".
- 4) Un manómetro de 10" verticalmente inclinado se configura en una posición nivelada y estable. Se adjunta un tubo transparente que une a las válvulas correctos en el manómetro y el tubo de pitot.
- 5) Los siguientes datos deben ser guardados para cada prueba:

- Designación del tubo de carbón
- Temperatura y presión estática para cada tubo

6) Antes de insertar el tubo pitot se debe asegurar que el manómetro este a nivel

7) Insertar el tubo de pitot a la primera marca con el puntero en el flujo y observar. Permite la estabilización del manómetro inclinado, luego guardar y pasar al siguiente punto. Repita este proceso para todos los puntos de travesía (12) de dos puertos. Siguiendo el código de prueba ASME para la matriz de mediciones de área transversal, ya sea ducto redondo o ducto cuadrado.

8) Después de atravesar los dos puertos, una presión estática se mide introduciendo un tubo de acero de  $\frac{1}{4}$  " en la línea de combustible. Se medirá la presión estática mediante un manómetro de "Tubo U" o digital conectado al tubo de acero inoxidable de una sola pieza de tubo claro.

9) Tras la presión estática, la temperatura se medirá mediante la inserción de una termocopla en la línea de combustible.

c. Balance de aire limpio. En la mayoría, el flujo de aire primario es más alto de lo deseado y se reducirá para optimizar el rendimiento. Antes de optimizar el flujo de aire primario es prudente llevar a cabo un equilibrio limpio. Esto asegurará que las velocidades mínimas de la línea de combustible se mantengan después de optimizar el flujo de aire primario. La velocidad del aire en todas las líneas de combustible debe exceder 3.300 pies/minuto. Las velocidades de la línea de combustible sobre 3.300 pies/minuto permiten que el carbón caiga hacia fuera, acumule en funcionamientos horizontales de las líneas de combustible. La velocidad mínima de 3.300 pies/minuto incluye un margen de seguridad del 10% por encima de la velocidad de línea mínima absoluta de 3.300 pies/minuto. Las acumulaciones de la línea de carbón pueden causar inestabilidades de la llama de la pulsación del quemador y paros posibles.

Las líneas de combustible son balanceadas por el proceso de iteración que utiliza los orificios de ensayo del acero de carbón. Debe lograrse un equilibrio de aire limpio con un máximo de  $\pm 2\%$  de desviación de la media entre todas las líneas de combustible de un pulverizador. Después de determinar la configuración óptima del orificio, se instalan los orificios de la serie 400 endurecidos permanentes. Después de la instalación de orificios, el aire limpio balanceado siempre debe ser verificado por las líneas de combustible.

Las pruebas de aire limpio de también se requieren para determinar si la resistencia de la línea de combustible es mostrada por las siguientes figuras:

*Figura 13: Orificios típicos de la línea de carbón*



Los orificios deben estar lo más arriba posible o abajo de los grifos de prueba. 10 diámetros de tubo preferidos

d. Formas de medir los flujos de aire. Una de las formas para medir los flujos de aire es emplear la ecuación de Bernoulli, que describe la relación y velocidad de un flujo. Estos dispositivos guían el flujo en una sección transversal en diferentes áreas (diferentes diámetros de los tubos), esto provoca variaciones en la presión y la velocidad de flujo, entonces midiendo los cambios en la presión, la velocidad de flujo puede entonces calcularse.

Caudalímetros de presión diferencial, aunque es simple en la construcción y es ampliamente utilizado en la industria, tienen un inconveniente en común: Crean siempre una cierta cantidad de caída de presión, que pueden o no ser toleradas en una aplicación en particular.

$$M = \frac{Cq YA \sqrt{2gc \rho_1(P_1 - P_2)}}{1 - \beta}$$

Donde:

M = Tasa de flujo (lbs/s)

Cq = Coeficiente de descarga, sin dimensiones, depende del dispositivo utilizado, sus dimensiones e instalación.

Y = Factor de compresibilidad, sin dimensiones, igual a 1.0 para la mayoría de los Líquidos y para gases donde está la caída de presión en el dispositivo de menos de 20% de la presión inicial.

$A$  = El área transversal de la garganta ( $\text{ft}^2$ )

$gc$  = Constante proporcional ( $32.17 \text{ lb, ft/lbf s}^2$ )

$P_1$  = Presión estática nivel alto

$P_2$  = Presión estática nivel bajo

$\beta$  = Cociente del diámetro de la garganta al diámetro de la tubería

$\rho_1$  = Densidad a presión y temperaturas por nivel alto

A pesar de estos elementos pueden dimensionarse con considerable exactitud de cálculo, estos deben ser calibrados antes en una prueba de laboratorio. Ciertos factores importantes deben ser considerados para las medidas exactas. Estos son:

- Ubicación en la red de tuberías y conductos en relación a curvas o cambios de sección
- Ubicación y tipo de válvulas de presión
- Posición del elemento en relación con dirección del flujo
- Tipo y disposición de tuberías para medición

3. Balance de aire sucio. La isocinética de muestreo del carbón se realiza para cumplir con los siguientes requisitos:

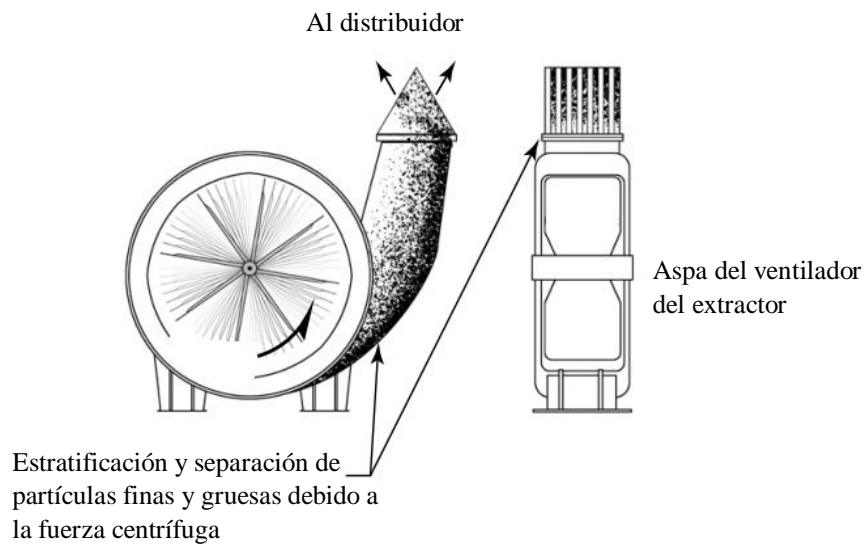
1. Determinar el balance relativo de tubo a tubo de combustible.
2. Cuantificar cada proporción de combustible a la línea de aire
3. Cuantificar el aire del pulverizador a la proporción de combustible.
4. Cuantificar individualmente el flujo de aire y velocidad de la línea de combustible.
5. Determinar el balance de flujo de aire de tubería a tubería.
6. Cuantificar la temperatura de la línea de combustible y presión estática.
7. Obtener muestras de combustible para el análisis de finura de carbón.

Es necesario cuantificar estos parámetros para determinar el rendimiento del pulverizador, un factor importante para lograr el desempeño óptimo de la unidad.

Para el rendimiento óptimo del pulverizador requiere los siguientes parámetros:

- Balance del combustible de tubo a tubo dentro del 10% del flujo medio.
- Balance de flujo de aire sucio de tubo a tubo dentro del 5% del flujo promedio de aire.
- Optimizar el aire del pulverizador a la proporción del combustible.
- Balancear el combustible de pulverizador a pulverizador dentro del  $\pm 5\%$  de la media.
- Temperatura de salida del pulverizador  $\geq 155^\circ\text{F}$  (carbones bituminosos).

*Figura 14: Distribución de partículas de carbón en la salida del extractor.*



a. El cálculo de flujo de aire sucio puede realizarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$1. \text{ Densidad } (\rho) = \frac{460+70^\circ\text{F}}{460+T} \times \frac{Bp+Sp/13.6}{29.92''\text{Hg}} \times 0.075 \frac{\text{lbs}}{\text{F}} t^3$$

$$2. \text{ Velocidad (fpm)} = 1096 \frac{\sqrt{vh}}{\sqrt{\rho}} \times \text{sonda K}$$

$$3. \sqrt{vh} = \frac{\sum_i^n \sqrt{vh1} + \sqrt{vh2} + \sqrt{vh3} + \dots + \sqrt{vhn}}{n}$$

$n$  = Números de puntos transversales (usualmente 24)

$$4. \text{ \% desviación de la media} = \frac{\text{Velocidad - Promedio de la velocidad}}{\text{Promedio de la velocidad}} \times 100$$

$$5. \text{ Flujo Volumétrico, } Q \text{ (cfm)} \quad Q = (A) (V)$$

$$6. \text{ Flujo de masa, } m \text{ (lb/hr)} \quad m = (Q) (\rho) (60)$$

b. Fórmulas para reducir el aire sucio y datos de muestreo isocinético del carbón

$$\text{Flujo de carbón} = \frac{\text{peso de la muestra (gramos)}}{453.6 \text{ gramos/libra}} \times \frac{60 \text{ minutos/hora}}{\text{Tiempo de la muestra total}} \times \frac{\text{área del tubo} - ft^2}{\text{área de la punta de la muestra} - ft^2}$$

$$\text{área de la punta de la muestra} = 0.0021 ft^2$$

$$\text{Relación aire, combustible} = \frac{\text{Flujo de aire en libras por hora}}{\text{Flujo de carbón en libras por hora}}$$

c. Procedimiento de muestreo de carbón pulverizado

1) Equipo necesario. Una punta de muestra con ángulo dirige los humos del conducto en el recipiente, donde un filtro de fibra de vidrio atrapa y recoge las partículas. Por el otro lado un aspirador proporciona la succión a través del tubo de extensión, que proporciona la fuerza motriz para extraer la muestra en el recipiente del filtro. Un tubo de muestra de gas y una termocopla se pueden conectar a la sonda. La cuantificación de oxígeno y temperatura pueden utilizarse para determinar rendimiento de calentador de aire y fugas.

2) Recolección de una muestra de carbón pulverizado

- Marque en una bolsita de Ziploc de 1 galón, la utilidad, la unidad, el conducto, la fecha y la hora.
- Prepare la sonda asegurándose de que el papel de filtro limpio esté instalado en el recipiente. Efectúe la prueba de manera que pueda insertarse en el primer puerto.
- Si se va a registrar la temperatura, fije un termopar a la sonda con el cable. Conecte un cable de plomo de la sonda al termómetro
- Si se va a analizar el gas, fije un tubo de acero inoxidable de 1/4 pulgada a la sonda con alambre. Calibre el analizador según sus procedimientos. Conecte el tubo del analizador a la sonda
- La sonda en el conducto a través del puerto de prueba, teniendo cuidado de no tocar los lados o cualquier área donde una materia extraña puede contaminar la muestra
- Encienda el suministro de aire. (idealmente la presión debe estar entre 60 y 100 PSI)

- Inserte la sonda en el conducto a través del puerto de prueba, teniendo cuidado de no tocar los lados o cualquier área donde la materia extraña pueda contaminar la muestra.
- Lea y registre la temperatura y el oxígeno
- Pasar al siguiente punto de muestreo
- Una vez completado el último punto, retire la sonda del conducto, teniendo cuidado de no apagar el aire de aspiración y de tener cuidado de no entrar en contacto con los lados del puerto de la muestra
- Espere que la sonda se enfríe y extraiga el cartucho del filtro y desmonte el contenido del filtro en la bolsita y selle.

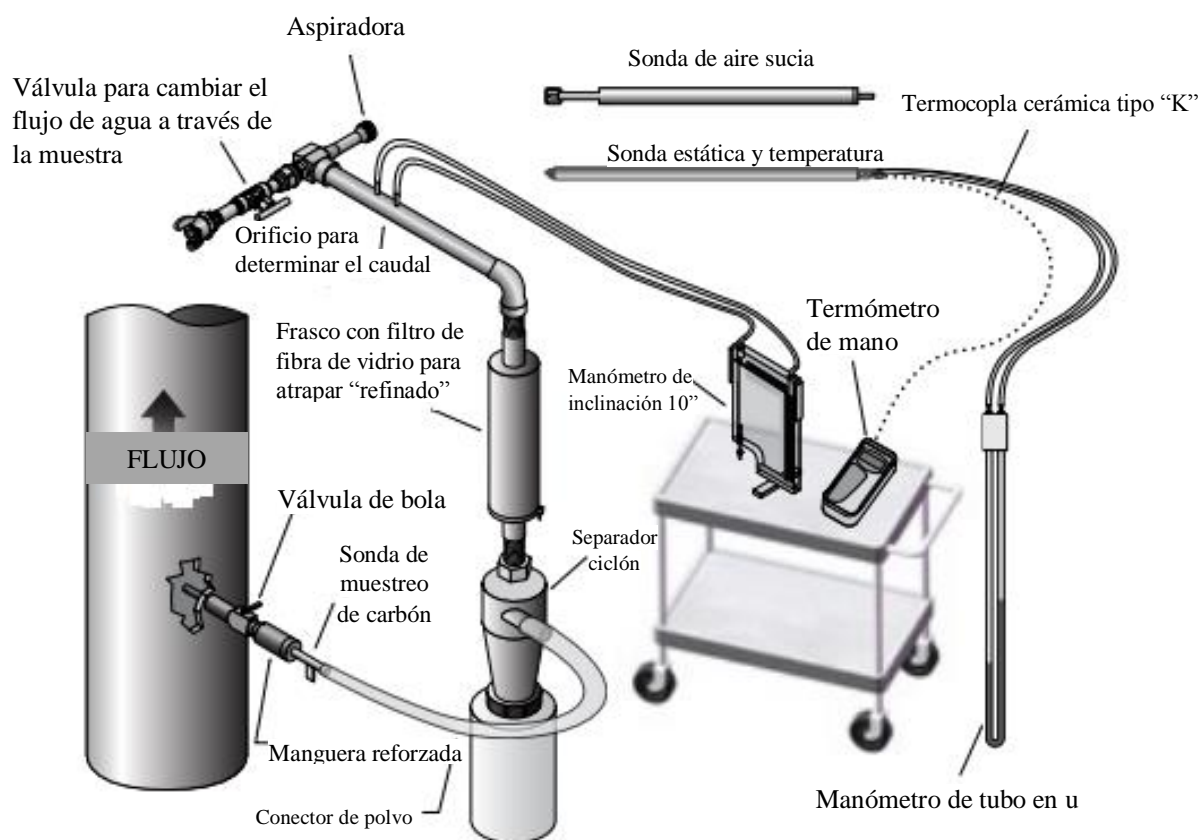
Una vez completado el muestreo, los pasos de ensamblaje se invierten y el papel del filtro se retira del ensamblaje de la boquilla y se embolsa. El papel del filtro, la bolsa y la muestra entonces se pesan y la diferencia entre los pesos iniciales y finales es la cantidad de muestra del polvo/del gas recogida. El análisis de los depósitos en el papel de filtro es un medio para obtener una visión rápida de las características de combustión en el horno. Las diferencias en la carga de polvo/gas entre los conductos pueden dar una indicación relativa de la eficiencia de la combustión entre los lados izquierda y derecho del horno. Además, un depósito negro pesado de ceniza en el papel puede indicar malas características de la combustión en el frente del quemador; por lo general un producto de uno o más de los siguientes: balance de aire secundario deficiente, ajustes de registros incorrectos, presiones del atomizador, pitot de toma muestra gastada, dañada u obstruida, etc. Cualquiera de estas posibilidades justificaría nuevas pruebas "específicas" para determinar el problema.

#### 4. Procedimiento de tamizado de carbón pulverizado (Fineza)

- 1) Obtener la muestra de carbón pulverizado durante las condiciones de prueba realizada en el balance de aire sucio.
- 2) Pesaje de muestras: Pesar 50 gramos (si es posible) de la muestra de carbón pulverizado.
- 3) Registre el peso de la muestra restante en el tamiz de malla 200 (debido al rendimiento del pulverizador). Registre la cantidad de muestra que pasa el tamiz del acoplamiento de 200 (esta es las partículas finas). Determinar el porcentaje de las muestras totales.
- 4) El sistema de carbón pulverizado es más eficiente entre más fina sea la muestra, normalmente el 75% de la muestra de 50 gramos debe pasar a través del tamiz 200.

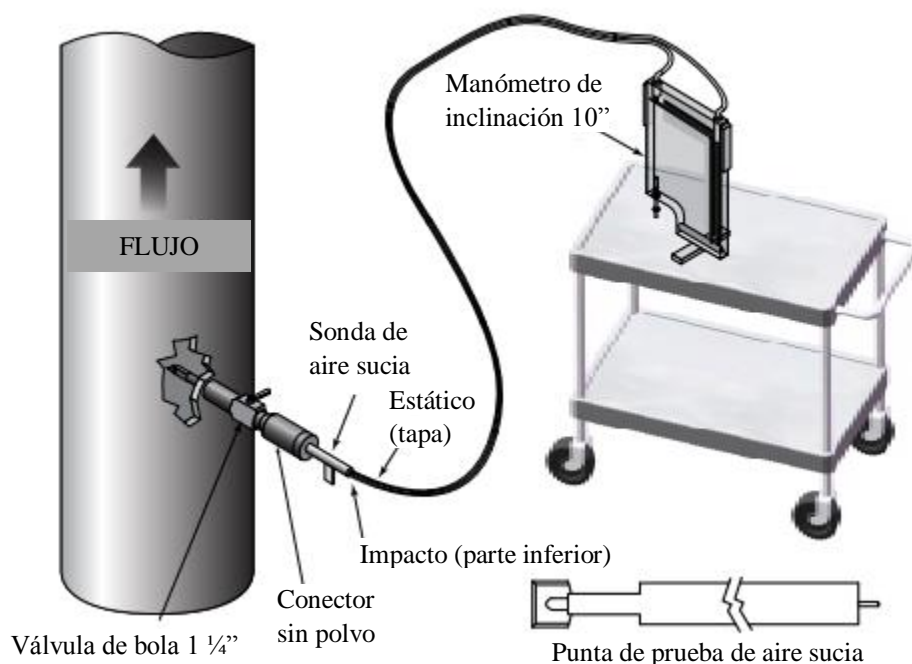
a. Fineza del carbón y balance del combustible. La fineza del carbón es averiguada recolectando una muestra representativa del carbón de cada línea del quemador y sacudiendo la muestra con una serie de coladores. Las muestras de la fineza del carbón se deben recoger de todas las líneas del combustible de un pulverizador específico. La fineza del pulverizador se considera el promedio ponderado de todas las muestras de la fineza recolectadas. Para obtener una muestra representativa de carbón debe utilizarse:

*Figura 15: Proceso muestra fineza del carbón*



La sonda de aire sucio se utiliza en conjunto con el muestreador de aire/combustible para medir la línea de flujo de combustible y determinar las tasas de muestreo isocinético resultado del balance de aire sucio.

Figura 16: Sonda de aire sucio



Varios factores mecánicos afectan la fineza del carbón. Algunos de estos factores son la condición y geometría de los elementos de molienda, las holguras críticas, las tensiones de los resortes. Un pequeño vistazo de tolerancias críticas para alcanzar la fineza óptima del carbón de diversos tipos de pulverizadores.

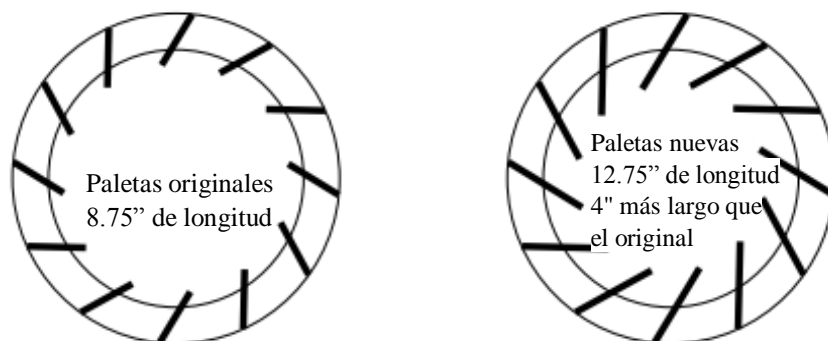
Menos del rendimiento del molino deseado después de que las variables mecánicas y de mantenimiento sean abordadas pueden deberse a la capacidad del pulverizador marginal o a la calidad del carbón diferente de la capacidad o diseño del pulverizador. La modificación del pulverizador se requiere a veces para alcanzar la fineza y el equilibrio deseados del combustible.

b. Modificaciones para mejorar el rendimiento del pulverizador. Sustitución de paletas de clasificadoras curvas con paletas rectas en molinos. Los molinos utilizan las láminas clasificadoras que se curvan en el borde que se arrastra. Esta curva detiene el "remolino" impartida por paletas que facilita la separación de partículas gruesas y finas de carbón. Las láminas rectas del clasificador aumentan el "remolino", mejorando la fineza y la homogeneización de la mezcla de dos fases.

Hojas de clasificadoras extendidas. Aumento de la longitud de la hoja remolino que rechaza partículas más gruesas y mejora la distribución de combustible. Las extensiones de la hoja del clasificador se han

terminado en todos los pulverizadores que utilizan clasificadores del tipo centrífugo. Las láminas extendidas del clasificador pueden mejorar fineza entre el 5% y el 15% que pasa por el acoplamiento.

*Figura 17:* Mejora en el balance del combustible del pulverizador con las paletas extendidas del clasificador.



Las desviaciones son el porcentaje de desviaciones del flujo de combustible medio o peso de la recuperación.

*Tabla 2: Pruebas previas a la modificación*

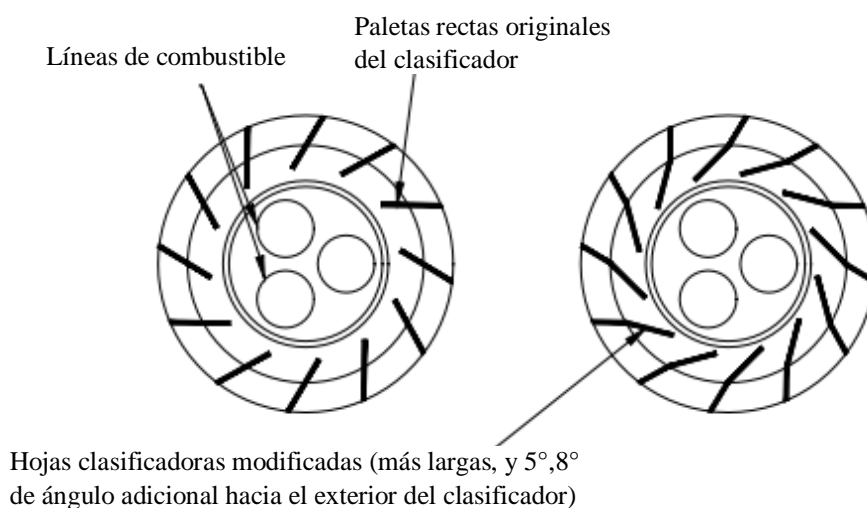
VELOCIDADES DEL AIRE SUCIO	MUESTRA RECUPERADA (g)	
+8.27%	+13.2%	Máxima desviación
-6.07%	-18.3%	Mínima desviación

*Tabla 3: Pruebas posteriores a la modificación*

VELOCIDADES DEL AIRE SUCIO	MUESTRA DEL FLUJO DE COMBUSTIBLE (g)	
+1.55%	+5.45%	Máxima desviación
-2.33%	-6.05%	Mínima desviación

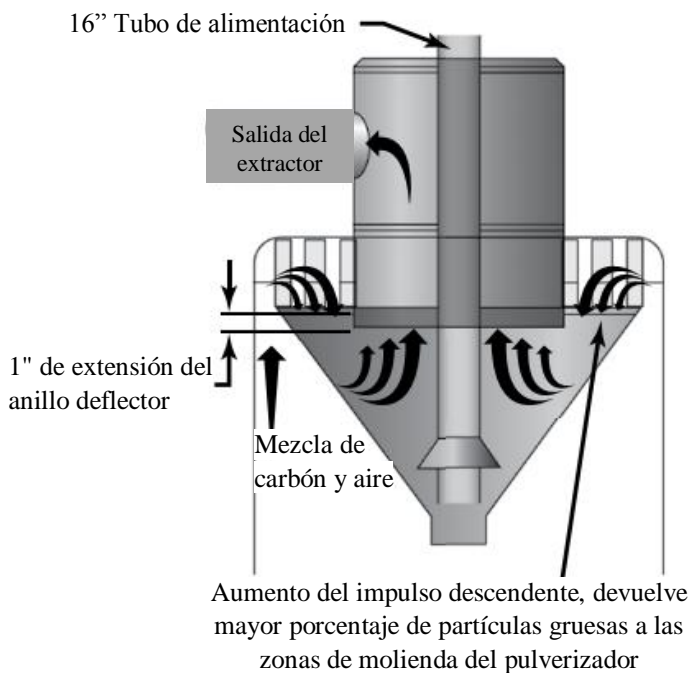
Instalación de palas clasificadoras angulares que cambian el diámetro del remolino. Las hojas se inclinan más hacia el exterior del molino y la parte posterior de otras hojas del clasificador. Las partículas de carbón más grandes, que se aceleran más que las finas debido al ímpetu más alto, chocan con las láminas clasificadoras y se rechazan. Las cuchillas de clasificador angulares están diseñadas para pulverizadores con hojas clasificadoras fijas. Las cuchillas clasificadoras de los molinos están en un eje giratorio que permite ángulos variables.

*Figura 18: Clasificadores angulares tipo cuchillas*

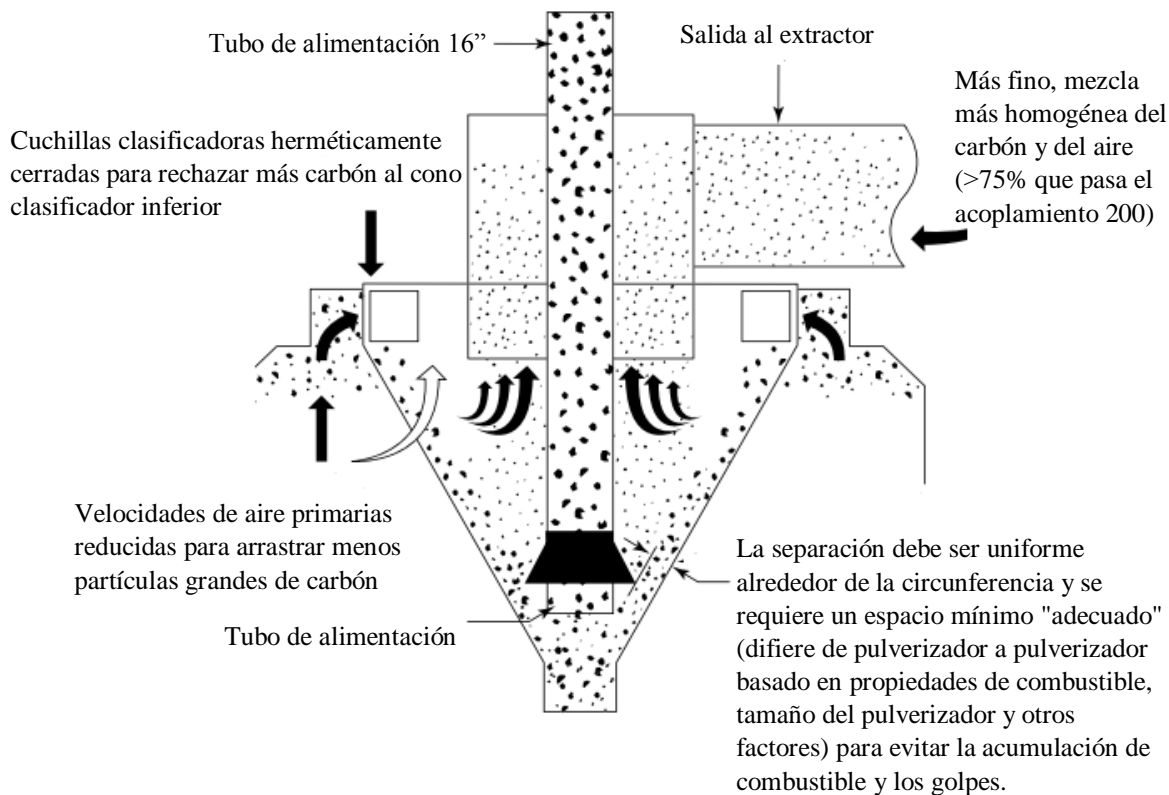


Extensión de las faldas de salida del clasificador o de los anillos deflectores, esto se realiza para cambiar la dirección de las partículas de carbón en una dirección descendente hacia el área de rechazo del clasificador. El aumento del impulso hacia abajo y vuelta de  $180^\circ$  de las partículas con mayor masa permite que se lleven menos de estas partículas grandes a las líneas de combustible. Esta modificación es aplicable a todos los pulverizadores que utilicen clasificadores centrífugos. Una extensión de 1" de la falda del enchufe debajo de la parte inferior de las láminas del clasificador (recipiente del molino, también llamado anillo del deflector) o el sombrero de copa invertido es suficiente.

*Figura 19: Extensión del faldón de salida del clasificador*

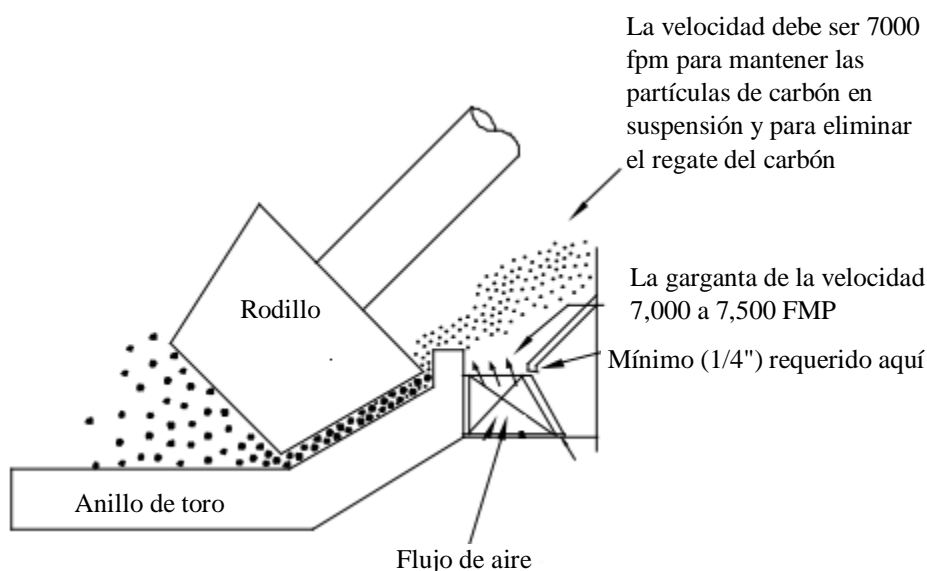


*Figura 20: Circulación del carbón a través de un clasificador del molino*



Las holguras de la garganta del pulverizador deben verificarse antes de optimizar el flujo de aire primario. Las gargantas pulverizadoras que no tienen el tamaño adecuado o que han sido agrandadas por el desgaste pueden ocasionar un goteo o derrame de carbón grave. El regate del carbón es carbón crudo que se rechaza a través de la descarga de la piritita de los pulverizadores. Esto es causado cuando la velocidad a través de la garganta del pulverizador es demasiado baja para mantener la suspensión del carbón. Las velocidades del aire a través de la garganta del pulverizador deben estar entre 6.500 y 7, 500 fpm cuando están calculadas sobre una base libre del jet. El aire a velocidades por encima de 7.000 fpm tendrá suficiente energía para evitar que el carbón caiga a través de la garganta y llevará el carbón al clasificador.

*Figura 21: Velocidades apropiadas de la garganta del pulverizador.*

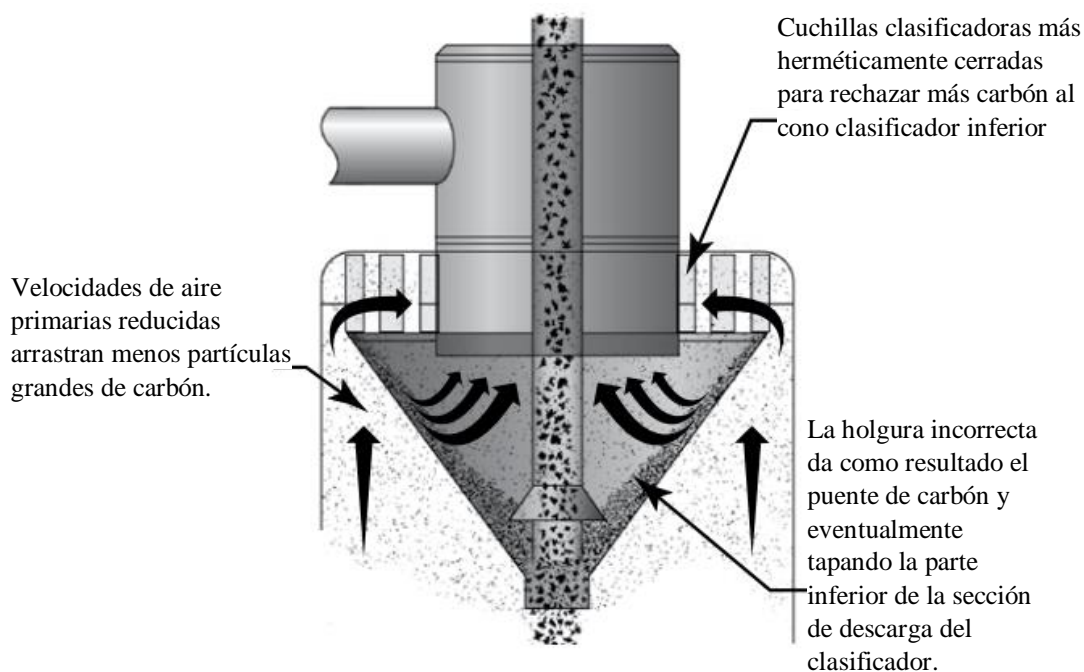


c. Resumen de optimización del pulverizador. Lograr un rendimiento óptimo del pulverizador es de primordial importancia para el calor, la fiabilidad de la caldera, el cumplimiento de las emisiones y los combustibles ceniza. Para resumir los siguientes elementos son necesarios para lograr un rendimiento optimizado del pulverizador:

- Tubería al equilibrio de aire limpio del tubo dentro del  $\pm 2\%$  de la velocidad media de la tubería.
- Tubería para canalizar el balance de combustible dentro del  $\pm 10\%$  del flujo de combustible de la tubería del pulverizador.
- Tubería para canalizar el balance de la velocidad del aire sucio dentro del  $\pm 5\%$  de la velocidad del aire sucio de la tubería del pulverizador.

- Cociente aire/combustible de 1.8 libras de aire por libra de combustible en pulverizadores.
- Nivel mínimo de la fineza del carbón de 75% que pasa el acoplamiento 200 y menos el de 0.1% restante en el acoplamiento 50
- Pulverizador al aire de la masa del pulverizador y balance del combustible dentro del  $\pm 5\%$ .
- Temperatura de salida del pulverizador de 155°F o superior (dependiendo de las propiedades del carbón).
- Velocidad mínima de la línea de combustible de 3,300 fpm
- Velocidad de la garganta del pulverizador de 6.500 a 7.500 fpm calculado sobre una base libre del jet.

*Figura 22: Circulación del carbón a través de un clasificador de molino*

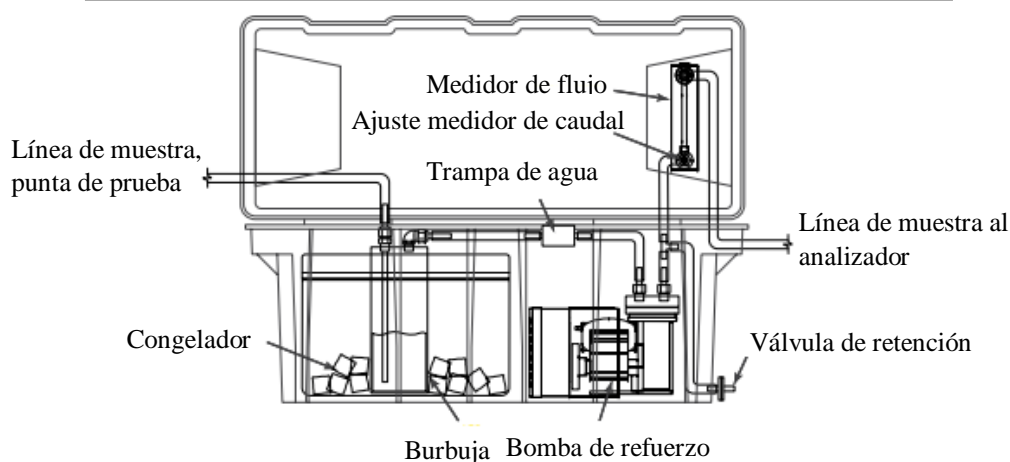


5. Termocopla de alta velocidad (HVT). Usando puertos de observación existentes del horno, la sonda de 2" se puede utilizar para desarrollar un perfil de las características de combustión en la salida del horno, es decir, el exceso de temperatura del gas de la chimenea y el nivel de oxígeno. Debemos de tener una funda para ser el medio más rápido, más eficaz de documentar todo el proceso de combustión.

a. Muestreo de gas. Como se mencionó anteriormente, el análisis y el muestreo de gases es una parte muy importante para la mejora y optimización de la combustión. El gas de combustión se muestra en varios lugares a lo largo de la caldera, desde la salida del horno utilizando la sonda de HVT, el análisis de gases a la salida del horno proporciona una idea sobre las características de combustión del horno, mientras que en el muestreo de gas en otros lugares permite el cálculo de la infiltración de aires específicos por área, así como salida de la unidad total.

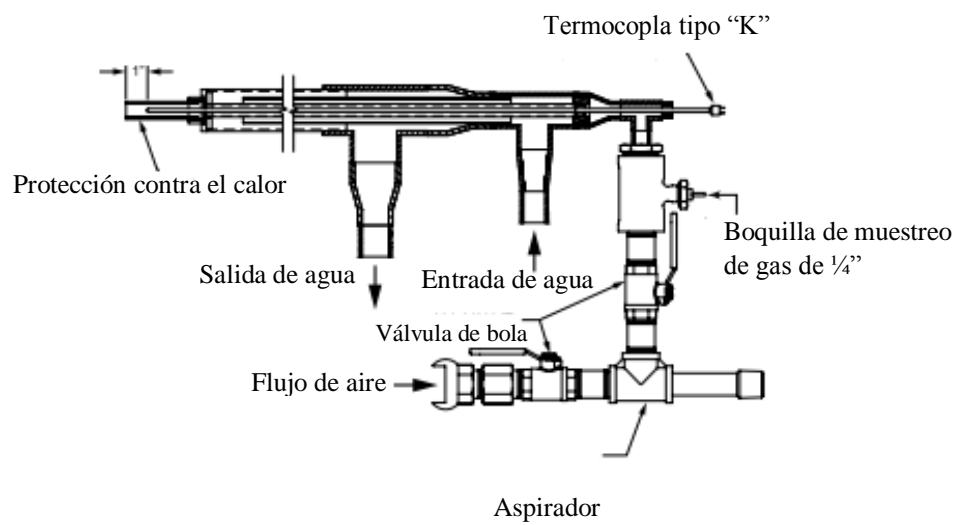
El equipo que utilizamos debe ser altamente preciso permaneciendo portátil, actualmente se utiliza un portátil analizador de 5 gases con una bomba interna junto con un sistema de acondicionamiento de gas. El analizador puede configurarse para medir entre 4 a 6 gases ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ , y  $C_xH_x$ ). El sistema de acondicionamiento de gas se compone de una bomba de refuerzo, conjunto de filtro, válvula/condensador, y medidor de flujo.

*Figura 23: Acondicionador de muestreo de gas*



b. Sonda HVT. Con suficiente flujo de agua (aproximadamente de 25 a 30 gal/min y un mínimo de 80 PSI) y termocoplas especiales, la sonda es capaz de operar en ambientes de hasta 2700 °F, normalmente, la sonda es equipada con una termocopla nominal tipo “K” de poco menos de 2500 °F. Este arreglo es en general absolutamente convenientes para unidades con temperaturas de gas de la salida del horno de 2200 °F. Las sondas HVT pueden fabricarse en cualquier longitud desde 4’ hasta 20’, sin embargo, la mayoría de las aplicaciones pueden abordarse con una sonda de 12’ o 20’ de longitud.

Figura 24: Sonda HVT



## VI. RESULTADOS

### A. Comprobación de báscula

En la primera comprobación de báscula se encontró 1.1% de error, después se solicitó al departamento de instrumentación que realizara una calibración de báscula como se explica en la metodología, después se realizó la segunda comprobación de báscula dando como resultado: 0.16% de error.

*Tabla 4: Comprobación de báscula*

Comprobación Báscula	Báscula Estática	Báscula Dinámica	Error %
1	51.70 Toneladas	52.27 Toneladas	1.1%
2	54.32 Toneladas	54.41 Toneladas	0.16%

### B. Balance de aire limpio

Siguiendo los pasos descritos en la metodología se realizó la primera corrida de balance de aire limpio, arrancando el molino de carbón pulverizado en vacío, es decir, sin carga de carbón, de esta manera se obtuvo el siguiente resultado:

*Tabla 5: 1er resultado balance aire limpio*

Punto	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3
1	0.39	0.39	0.34
2	0.44	0.35	0.35
3	0.38	0.39	0.39
4	0.38	0.41	0.42
5	0.41	0.42	0.40
6	0.42	0.45	0.39
7	0.42	0.46	0.42
8	0.44	0.43	0.39
9	0.50	0.44	0.36
10	0.46	0.45	0.37
11	0.38	0.38	0.31
12	0.30	0.29	0.27

Promedio presión dinámica	<u>0.6265</u>	“H2O
Temperatura	<u>113.7</u>	°F
Presión estática	<u>1.52</u>	“H2O
Densidad	<u>0.06665</u>	Lbs/Ft <sup>3</sup>
Velocidad	<u>2,181</u>	Pie/Min
Flujo de aire medido	<u>69,146</u>	Lbs/Hr
Flujo de aire indicado	<u>75,500</u>	
% Desviación	<u>-9.19%</u>	

Se recomendó instalar una placa de orificio de 17.5” en la línea No. 1 de carbón pulverizado y se obtuvo el siguiente resultado:

*Tabla 6: Resultado con eficiencia balance aire limpio*

Punto	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3
1	0.25	0.27	0.28
2	0.24	0.27	0.25
3	0.24	0.27	0.27
4	0.27	0.27	0.27
5	0.28	0.27	0.25
6	0.23	0.25	0.25
7	0.27	0.26	0.27
8	0.31	0.28	0.30
9	0.32	0.30	0.30
10	0.30	0.30	0.29
11	0.26	0.26	0.22
12	0.23	0.23	0.11

Promedio presión		
dinámica	0.5120	“H2O
Temperatura	95.5	°F
Presión estática	9.51	“H2O
Densidad	0.07041	Lbs/Pie <sup>3</sup>
Velocidad	1,734	Pie/Min
Flujo de aire medido	58,078	Lbs/Hr
Flujo de aire indicado	57,500	
% Desviación	1%	

### C. Balance de aire sucio

Siguiendo los pasos descritos en la metodología se realizó la primera corrida de balance de aire sucio, arrancando todo el sistema de carbón pulverizado junto con la caldera y dando tiempo para que se estabilizara la operación. Se obtuvo el siguiente resultado:

*Tabla 7: 1er Resultado, tubo 1 balance aire sucio*

Tubo 1		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	0.58	1.10
2	0.59	1.10
3	0.79	1.10
4	0.90	1.20
5	1.00	1.00
6	1.40	1.20
7	1.70	1.50
8	1.60	1.40
9	1.40	1.30
10	1.40	1.30
11	1.30	1.10
12	0.75	0.91

Presión diferencial	1.57	“H2O
Promedio presión		
dinámica	1.0633	“H2O
Temperatura	138	°F
Presión estática	10.5	“H2O
Densidad	0.0656	Lbs/Pie <sup>3</sup>
Velocidad	4,278	Pie/Min
Flujo de aire	20,654	Lbs/Hr.
Recuperación	456.00	Gramos
Flujo de carbón	8,812	Lbs/Hr.

*Tabla 8: 2do Resultado, tubo 2 balance aire sucio*

Tubo 2		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	1.30	1.50
2	1.40	1.50
3	1.60	1.60
4	1.70	1.70
5	1.60	1.80
6	1.50	1.80
7	1.00	1.20
8	0.72	1.10
9	0.63	0.95
10	0.55	0.83
11	0.50	0.78
12	0.40	0.66

Presión diferencial	1.57	"H2O
Promedio presión dinámica	1.0638	"H2O
Temperatura	128	°F
Presión estática	11.8	"H2O
Densidad	0.0670	Lbs/Pie <sup>3</sup>
Velocidad	4,236	Pie/min
Flujo de aire	20,882	Lbs/Hr.
Recuperación	276.80	Gramos
Flujo de carbón	5,349	Lbs./Hr.

*Tabla 9: 3er Resultado, tubo 3 balance aire sucio*

Tubo 3		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	0.75	0.85
2	0.80	0.86
3	0.81	0.89
4	0.85	0.93
5	0.90	1.00
6	1.00	1.00
7	1.10	1.00
8	1.10	0.99
9	1.00	0.96
10	1.00	0.90
11	0.98	0.88
12	0.75	0.59

Presión diferencial	1.26	"H2O
Promedio presión dinámica	0.9530	"H2O
Temperatura	135	°F
Presión estática	12.3	InH2O
Densidad	0.0662	Lbs./Pie <sup>3</sup>
Velocidad	3,816	Pie/Min
Flujo de aire	18,599	Lbs./Hr.
Recuperación	318.60	Gramos
Flujo de carbón	6,157	Lbs./Hr.

*Tabla 10: 4to Resultado, tubo 4 balance aire sucio*

Tubo 4		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	1.30	1.00
2	1.20	1.00
3	1.20	1.20
4	1.20	1.20
5	1.30	1.20
6	1.20	1.30
7	1.10	1.00
8	1.10	1.00
9	1.00	0.93
10	0.99	0.90
11	0.86	0.86
12	0.82	0.75

Presión diferencial	1.47	"H2O
Promedio presión dinámica	1.0300	"H2O
Temperatura	130	°F
Presión estática	11.5	"H2O
Densidad	0.0666	Lbs./Pie <sup>3</sup>
Velocidad	4,111	Pie/Min
Flujo de aire	20,167	Lbs/Hr
Recuperación	457.30	Gramos
Flujo de carbón	8,837	Lbs./Hr.

*Tabla 11: Desviaciones del flujo de aire +/- 5%*

Desviaciones del flujo de aire +/- 5%				
Tubo	Flujo de aire	% Desv.	+5% Desv.	-5% Desv.
1	20,654	20,075	21,079	19,072
2	20,882	20,075	21,079	19,072
3	18,599	20,075	21,079	19,072
4	20,167	20,075	21,079	19,072

*Tabla 12: Desviaciones del flujo de carbón +/- 10%*

Desviaciones del flujo de carbón +/- 10%				
Tubo	Flujo de carbón	% Desv.	+10% Desv.	-10% Desv.
1	8,812	7,289	8,018	6,560
2	5,349	7,289	8,018	6,560
3	6,157	7,289	8,018	6,560
4	8,837	7,289	8,018	6,560

Con la instalación de la placa de orificio durante el balance de aire limpio automáticamente se balancearon la cantidad de combustible y de aire sucio en las dos líneas del sistema de carbón pulverizado.

*Tabla 13: Eficiencia tubo 1, balance aire sucio*

Tubo 1		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	1	1.4
2	1.3	1.6
3	1.3	1.6
4	1.3	1.6
5	1.3	1.4
6	1.4	1.6
7	1.6	1.9
8	2	2
9	2	2.1
10	2.2	2.2
11	2.2	2.3
12	2.3	1.8

Presión diferencial	2.37	"H2O
Promedio presión dinámica	1.3054	"H2O
Temperatura	171	°F
Presión estática	9	"H2O
Densidad	0.6344	Lbs./Ft <sup>3</sup>
Velocidad	5,339	Pie/min
Flujo de aire	19,461	Lbs./Hr.
Recuperación	673.2	Gramos
Flujo de carbón	10,150	Lbs./Hr.

*Tabla 14: Eficiencia tubo 2, balance aire sucio*

Tubo 2		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	1.2	1
2	1.4	1.6
3	1.5	1.6
4	1.6	1.8
5	1.6	1.7
6	1.8	1.8
7	2	1.8
8	2.2	2
9	2.1	2.2
10	2.1	2.2
11	2.1	2.3
12	1.9	1.9

Presión diferencial	2.49	"H2O
Promedio presión dinámica	1.3388	"H2O
Temperatura	169	°F
Presión estática	8.6	"H2O
Densidad	0.6358	Lbs./Ft <sup>3</sup>
Velocidad	5,470	Pie/Min
Flujo de aire	19,982	Lbs./Hr.
Recuperación	657.9	Gramos
Flujo de carbón	9,920	Lbs./Hr.

*Tabla 15: Eficiencia tubo 3, balance aire sucio*

Tubo 3		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	1	0.7
2	1.3	0.7
3	1.4	1
4	1.5	1.2
5	1.6	1.4
6	1.7	1.4
7	1.7	1.6
8	1.9	1.9
9	1.8	1.9
10	1.9	2.1
11	1.8	2.1
12	1.6	1.9

Presión diferencial	2.10	"H2O
Promedio presión dinámica	1.2316	"H2O
Temperatura	180	°F
Presión estática	8.8	"H2O
Densidad	0.6251	Lbs/Ft <sup>3</sup>
Velocidad	5,074	Pie/Min
Flujo de aire	18,222	Lbs./Hr.
Recuperación	755.4	Gramos
Flujo de carbón	11,390	Lbs./Hr.

*Tabla 16: Eficiencia tubo 4, balance aire sucio*

Tubo 4		
Punto	Puerto 1	Puerto 2
1	1.2	0.95
2	1.4	1.4
3	1.5	1.5
4	1.5	1.6
5	1.5	1.6
6	1.6	1.7
7	1.7	1.8
8	1.7	1.8
9	1.9	1.8
10	1.9	2
11	1.8	2
12	1.7	2

Presión diferencial	2.27	"H2O
Promedio presión dinámica	1.2796	"H2O
Temperatura	169	°F
Presión estática	8.6	"H2O
Densidad	0.6358	Lbs/Ft <sup>3</sup>
Velocidad	5,228	Pie/Min
Flujo de aire	19,098	Lbs./Hr
Recuperación	796.8	Gramos
Flujo de carbón	12,014	Lbs./Hr

*Tabla 17: Desviaciones eficientes del flujo de aire +/- 5%*

Desviaciones del flujo de aire +/- 5%				
Tubo	Flujo de aire	% Desv.	+5% Desv.	-5% Desv.
1	19,461	1.4014	20,152	18,232
2	19,988	4.1142	20,152	18,232
3	18,227	-5.0264	20,152	18,232
4	19,098	-0.4892	20,152	18,232

*Tabla 18: Desviaciones eficientes del flujo de carbón +/- 10*

Desviaciones del flujo de carbón +/- 10%				
Tubo	Flujo de carbón	% Desv.	+10% Desv.	-10% Desv.
1	10,150	6.6070	11,955	9,782
2	9,920	-8.7295	11,955	9,782
3	11,390	4.7965	11,955	9,782
4	12,014	10.5400	11,955	9,782

#### D. Fineza

Utilizando el procedimiento que se indica en la metodología para medir fineza de carbón pulverizado y con la muestra extraída con el balance de aire sucio los resultados fueron los siguientes:

*Tabla 19: Muestra fineza de carbón*

Tubo No.	1	2	3	4
% Pasando 50 Mesh	98.95	98.90	98.10	97.00
% Restante en 50 Mesh	1.55	3.04	1.00	4.00
% Pasando 100 Mesh	95.14	96.31	96.70	94.15
% Pasando 200 Mesh	70.00	66.01	69.45	74.60
Muestra recuperada (Isocinética)	440.00	235.80	310.50	400.69
Promedio ponderado de la planta generadora				-
% Pasando 50 Mesh				98.19
% Restante en 50 Mesh				2.39
% Pasando 100 Mesh				95.40
% Pasando 200 Mesh				70.53

Se recomendó agregarle 1" al faldón del clasificador del molino de carbón pulverizado, como se describe en la metodología, utilizando la muestra extraída de la segunda corrida del balance de aire sucio y siguiendo siempre el procedimiento que indica la metodología.

*Tabla 20: Muestra eficiente fineza de carbón*

<b>Tubo No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
% Pasando 50 Mesh	99.94	99.94	99.98	99.80
% Restante en 50 Mesh	0.06	0.06	0.02	0.20
% Pasando 100 Mesh	96.14	97.42	97.38	95.40
% Pasando 200 Mesh	75.48	82.16	81.74	74.60
Muestra recuperada (Isocinética)	456.00	276.80	318.60	457.30
Promedio ponderado de la planta generadora				-
% Pasando 50 Mesh				<b>99.91</b>
% Restante en 50 Mesh				<b>0.09</b>
% Pasando 100 Mesh				<b>96.41</b>
% Pasando 200 Mesh				<b>77.76</b>

#### E. HVT

Por lo complicado de la realización de este análisis, solamente se realizó al terminar todos los ajustes de los cinco pasos anteriores, dando los siguientes resultados:

Temperatura del sobrecalentador:

Tabla 21: Análisis de gases HVT

		Este	→					Oeste	
Lado Este	↓	Puntos	Temp. F	NOx PPM	O2 %	Co2%	Co PPM	O2	Exc Aire
		1	1930	386	3.9	15.1	37	2.77	1.23
		2	1910	401	3	15.9	41	2.77	1.17
		3	1963	419	3.3	15.7	30	3.16	1.19
		4	1950	455	3.1	15.9	48	3.16	1.17
		5	2080	445	2.6	16.3	126	2.49	1.15
		6	2090	448	1.9	17	158	2.49	1.10
		7	2040	441	1.6	17.2	171	2.3	1.08
		8	1995	428	3	16	87	2.3	1.16
Lado Oeste	↑	8	2003	421	1	18	360	2.08	1.05
		7	1999	423	0.8	17.8	350	2.08	1.04
		6	2022	417	0.8	17.9	760	2.11	1.04
		5	1995	422	0.9	17.8	240	2.11	1.05
		4	2038	427	1.2	17.5	515	1.52	1.06
		3	2043	420	0.7	17.9	245	1.52	1.04
		2	1972	428	1	17.7	164	1.13	1.06
		1	1952	413	0.7	18	243	1.13	1.03
		Avg	1998.86	424.64	1.82	16.98	223.43	2.20	1.10
		NOx real:		226.6879	g/MMBTU				
		NOx deseado:		270	g/MMBTU				
		Diferencia:		43.31211	g/MMBTU				
1039	1018	983	996	1041	1002	1018	1007	1024	

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en la comprobación de báscula se hará un resumen financiero del ahorro en combustible en un día normal de operación tomando en consideración que la planta consume 1,157.04 Toneladas de carbón por día y vende 2,359,086.85 Kw/día estos datos fueron proporcionados por el personal de operación del reporte diario.

*Tabla 22: Ahorro financiero*

Comprobación de báscula	1	2
% de error	1.1%	0.16%
Consumo diario de carbón	1157.04 Toneladas	988.74 Toneladas
Venta de energía diaria	2359087 Kw	2359087 Kw
Precio Spot EE	US\$ 62.00/MW	US\$ 62.00/MW
Costo del carbón día (US\$111.00/Ton)	US\$ 12,8431.44	US\$ 12,8431.44
Ingreso Bruto	US\$ 14,6263.394	US\$ 14,6263.394
Utilidad	US\$ 17,831.954	US\$ 35,403.254
Diferencia	US\$ 17,571.3 por día	

Todos los resultados obtenidos después de realizar ajustes al sistema de carbón pulverizado fueron satisfactorios porque se logró ajustar a los rangos admisibles para tener un sistema de carbón pulverizado eficiente y todos los beneficios que se lograron con los ajustes realizados en el sistema de carbón pulverizado se resumen en la tabla siguiente:

<i>Tabla 23: Reducción total de Btu</i>
---

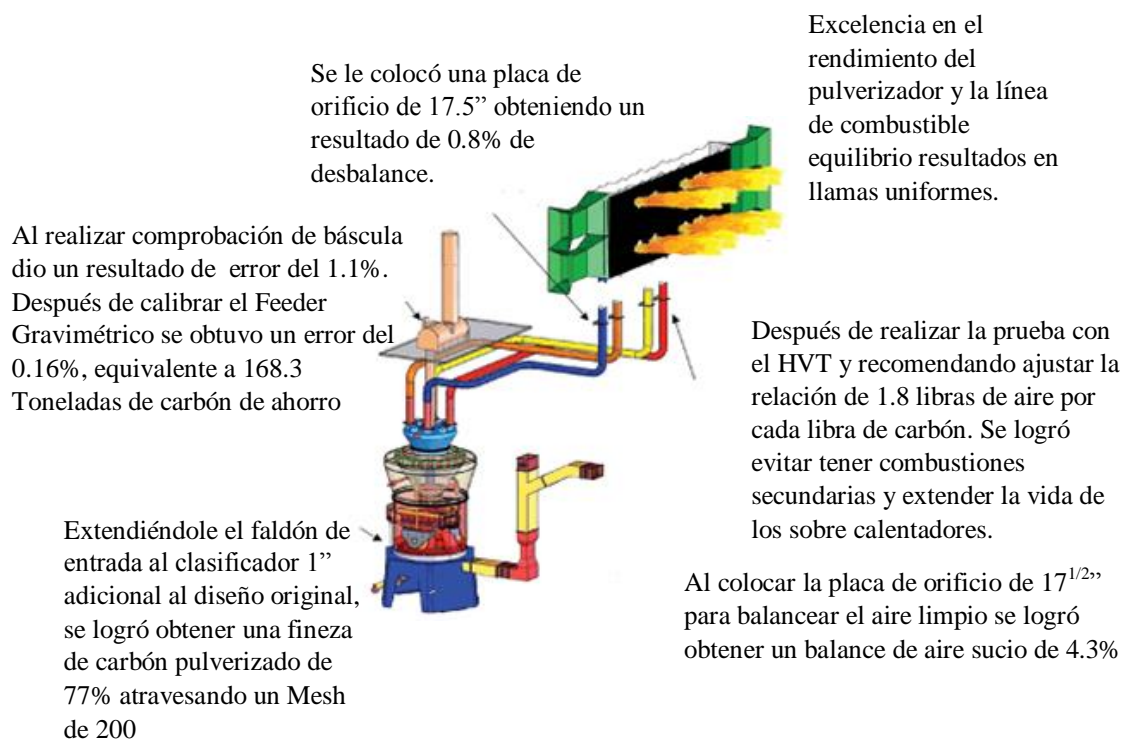
	Reporte diario No. 1	Reporte diario No. 2
Venta de energía/día	2,359,087 Kw	2,360.120 Kw
Consumo de carbón/día	1157.04 Toneladas	988.74 Toneladas
Poder calorífico del carbón	11,312 BTU/Lb	11,312 BTU/Lb
Heat Rate	12,231.80 Btu/Kw	10,150.25 Btu/Kw
Diferencia Heat Rate	2,081.55 Btu/Kw	

Se toma en consideración que no se logró abarcar al 100% de los ensayos, pruebas y ajustes que se pueden realizar en una planta generadora de energía eléctrica pero aún se lograron obtener muy buenos resultados.

En el HVT, cómo se puede observar la temperatura del gas saliendo del hogar FEGT por sus siglas en inglés, no excede 2,400F eso quiere decir que no tienen combustión secundaria dentro del hogar y se está aprovechando toda la temperatura en toda el área transversal de la caldera, sin poner en riesgo los sobre calentadores de la misma.

También se logra apreciar que se tiene una atmosfera de oxidación óptima en la cual involucra tener un 3% de oxígeno en la salida del hogar de la caldera, de esta manera se evita tener altos contenidos de monóxido de carbono que equivale a una combustión incompleta de combustible.

*Figura 24: Eficiencia del sistema de carbón pulverizado*



## VIII. CONCLUSIONES

- Se tiene como resultado una eficiencia en el sistema de carbón pulverizado ya que el objetivo principal era reducir 100btu/Kw, el reporte de la planta sin hacer las mejoras realizadas indicaban que el heat rate tenía un consumo de 12,231.80 Btu/Kw con las mejoras y calibraciones realizadas, la planta hizo una comparación dando un segundo reporte que indica que el heat rate tiene un consumo de 10,150.25 Btu/Kw, teniendo como resultado final una reducción de 2,081.55 Btu/Kw logrando una excelente eficiencia en el sistema de carbón pulverizado. Lo que garantiza que no habrá muchas pérdidas en el combustible y la planta tendrá ahorros financieros debido a estas mejoras.
- El consumo diario de carbón era de 1157.04 Toneladas y se logró reducir con la calibración de la báscula a 988.74 Toneladas de consumo diario de carbón.
- En el sistema financiero, los reportes indicaban que tenían una utilidad de US\$ 17,831.954 con la eficiencia establecida los reportes indicaron que se obtuvo una utilidad de US\$ 35,403.254 con una ganancia de US\$ 17,571.3 por día.
- La metodología se realizó como una guía ordenada de pasos y mediciones técnicas a seguir, para eficientar un sistema de combustión que emplea como fuente principal carbón mineral pulverizado, para aplicarlos cuando se requiera disminuir el costo de la producción de energía a partir de la disminución de la utilización de carbón pulverizado para producir energía eléctrica.
- A través de la eficiencia de este proyecto se realizaron trece elementos esenciales para la combustión óptima de la misma.

## IX. RECOMENDACIONES

- Según la eficiencia realizada en la planta generadora se dieron trece elementos esenciales para una combustión óptima.
  1. La salida del horno debe ser oxidante, preferiblemente un promedio de 3.0% sin un solo punto por debajo del 2.0%.
  2. Las líneas de combustible individuales se balancean por la prueba de "aire limpio" a una desviación del  $\pm 2\%$  de la media o mejor.
  3. Las líneas de combustible balanceadas por la prueba de "aire sucio", utilizando una sonda de velocidad de aire sucia, a  $\pm 5\%$  de desviación de la media o mejor.
  4. Las líneas de combustible fluyen balanceadas a  $\pm 10\%$  de desviación de la media o mejor.
  5. La fineza de las líneas del combustible será 75% o más que pasa una pantalla de acoplamiento 200. Las partículas que permanezcan en el acoplamiento 50 serán menos el de 0.1%.
  6. El flujo de aire primario se medirá con precisión y se controlará hasta un  $\pm 3\%$  de precisión.
  7. El aire de sobre fuego se medirá con precisión y se controlará hasta un  $\pm 3\%$  de precisión.
  8. El cociente primario del aire/combustible será controlado exactamente cuándo sobre pase la velocidad de línea mínima.
  9. La línea de combustible velocidades mínimas, será 3,300 fpm o superior. (3,300 fpm permite un  $\pm 10\%$  de desequilibrio, 3.000 fpm mínimo absoluto).
  10. Las tolerancias mecánicas de los quemadores y de los apagadores serán  $\pm 1/4"$  o mejor.
  11. La distribución secundaria de aire a los quemadores debe estar entre el  $\pm 5\%$  y el  $\pm 10\%$  de desviación de la media.
  12. La alimentación de combustible a los pulverizadores debe ser suave durante los cambios de carga y medirse y controlarse con la mayor precisión posible. Se prefieren alimentadores gravimétricos equipados con celdas de carga.
  13. La calidad y el tamaño de la alimentación de combustible deben ser consistentes. El apresto constante del carbón crudo de la alimentación a los pulverizadores es un buen comienzo.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Flame & combustion. J.A. Barnard – J.N. Bradley. Chapman and Hall 1985.
- Innovative combustion technologies, Inc. Quick reference guide 5<sup>th</sup> Edition.
- NFPA - 85F. – Installation and operation of pulverized fuel systems. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts 1991.
- Sulphur dioxide & nitrogen oxides in industrial waste gases: emission, legislation & abatement. Edited by Daniel Van Velzen. Euro courses. Chemical & environmental science. Vol. 3.
- Storm technologies, Inc. specialist in combustion & power. - 20<sup>th</sup> Anniversary Edition Providing Engineered Solutions since 1992.

## XI. ANEXOS

### ➤ ANEXO 1: Procedimiento para el uso de manómetro de inclinación de 10°

1. Retire el manómetro de la caja.
2. Gire el soporte a 90° para apoyar el manómetro.
3. Para abrir, gire ambas válvulas en la parte superior de los manómetros aproximadamente 1/2 gire en sentido contrario a las manecillas del reloj de la posición cerrada.
4. Conecte las mangueras de la sonda de prueba a las válvulas. El impacto o la manguera de alta presión se conecta a la válvula izquierda a medida que se enfrenta el manómetro, la manguera de presión estática o baja se conecta a la válvula derecha.
5. Gire el tornillo de mariposa en la parte inferior del manómetro hasta que la burbuja en el nivel en la parte superior del manómetro esté entre las dos líneas verticales, indicando que la unidad está nivelada.
6. Gire la perilla de ajuste cero en la parte inferior del manómetro hasta que la parte inferior del menisco esté nivelada con la marca de cero en la parte superior del manómetro, indicando cero.
7. Compruebe el manómetro y el tubo soplando en el lado de alta presión del manómetro y alternativamente, "pellizcando" sellando el tubo de alta y baja presión.
8. El manómetro está ahora configurado, nivelado, ajustado a cero y listo para ser utilizado en las pruebas.
9. Mover o golpear el manómetro puede hacer que se desnivele. Si durante la prueba el manómetro no se nivela, simplemente vuelva a nivelarlo según el paso 5 anterior.
10. La lectura del manómetro se realiza observando la escala del manómetro en la parte superior del menisco.

## XII. GLOSARIO

<b>Generación (electricidad)</b>	El proceso de producir energía eléctrica transformando otras formas de energía; también, la cantidad de eléctrico producido, expresado en vatios hora (Vh)
<b>Btu (Unidad Térmica Británica)</b>	Una unidad estándar para medir la cantidad de energía térmica igual a la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de 1 libra de agua en 1 grado Fahrenheit.
<b>Combustible fósil</b>	Cualquier combustible orgánico que ocurra naturalmente, tal como petróleo, carbón y gas natural.
<b>Caldera</b>	Un dispositivo para generar vapor para el proceso de la energía o para producir agua caliente para los propósitos de la calefacción o el suministro de agua caliente. El calor de una fuente de combustión externa se transmite a un líquido contenido dentro de los tubos de la carcasa de la caldera. Este líquido se entrega a un uso final a una presión, temperatura y calidad deseadas.
<b>Turbina</b>	Una máquina para generar energía mecánica rotatoria de un vapor (tal como agua, vapor o gas caliente).
<b>Gigawatt (GW)</b>	Mil millones de vatios.
<b>Kilowatt (kW)</b>	Mil vatios.
<b>Megawatt (MW)</b>	Un millón de vatios.
<b>Watt</b>	La unidad eléctrica de energía. El índice de transferencia de energía equivalente a 1 amperio que fluye bajo una presión de 1 voltio en el factor de energía de la unidad.

<b>Cogenerador</b>	Una instalación de generación que produce electricidad y otra energía térmica útil (como el calor o el vapor) utilizada para fines industriales, comerciales, de calefacción o de refrigeración.
<b>Cenizas volátiles</b>	Material partículas de ceniza de carbón que se retira del gas de combustión utilizando colectores de partículas de gas de combustión como filtros de tela y precipitadores electrostáticos. No disponible para la carga debido al desglose imprevisto.
<b>Energía</b>	La capacidad de hacer el trabajo según lo medido (energía potencial) o la conversión de esta capacidad al movimiento (energía cinética).
<b>Tarifa del calor (Btu/kWh)</b>	La cantidad de calor requerida para generar 1 kWh de electricidad.
<b>Carga eléctrica</b>	La cantidad de energía eléctrica suministrada o requerida en cualquier punto específico de los puntos de un sistema. El requisito origina en el equipo consumidor de energía de los consumidores.