

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Efectos provocados por desbalances del aire primario y carbón pulverizado conducidos en las tuberías desde un pulverizador hacia los quemadores de una caldera de tipo acuotubular, en el proceso de combustión en una Central Termoeléctrica de Escuintla.

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Luis Alejandro Mérida Gómez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en
Tecnología Industrial.

Guatemala

2017

Efectos provocados por desbalances del aire primario y carbón pulverizado conducidos en las tuberías desde un pulverizador hacia los quemadores de una caldera de tipo acuotubular, en el proceso de combustión en una Central Termoeléctrica de Escuintla.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Efectos provocados por desbalances del aire primario y carbón pulverizado conducidos en las tuberías desde un pulverizador hacia los quemadores de una caldera de tipo acuotubular, en el proceso de combustión en una Central Termoeléctrica de Escuintla.

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Luis Alejandro Mérida Gómez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en
Tecnología Industrial.

Guatemala


2017

Vo. Bo.:

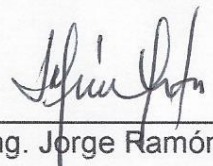
(f). 

Ing. Ronald Humberto Trabanino Gómez

Tribunal Examinador:

(f). 

Ing. Ronald Humberto Trabanino Gómez

(f). 

Ing. Jorge Ramón Méndez Costa

(f). 

Ing. Fernando Rafael Rivera Turcios

Fecha de aprobación: 17 de abril de 2017.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| LISTA DE TABLAS..... | ix |
| LISTA DE GRÁFICOS..... | x |
| RESUMEN | xi |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 3 |
| III. JUSTIFICACION..... | 4 |
| IV. MARCO TEÓRICO | 5 |
| A. CENTRAL TERMOELÉCTRICA. | 5 |
| B. COMBUSTIBLES FÓSILES..... | 6 |
| C. CARBÓN. | 6 |
| 1. Clasificación..... | 6 |
| 2. Propiedades..... | 8 |
| D. COMBUSTIÓN..... | 8 |
| 1. Sistema de combustión directa de carbón pulverizado..... | 8 |
| E. PULVERIZADORES..... | 9 |
| 1. Clasificación..... | 10 |
| F. TRANSPORTE DE CARBÓN PULVERIZADO..... | 11 |
| G. QUEMADORES..... | 12 |
| 1. Tipos..... | 12 |
| H. DESBALANCES DE AIRE-CARBÓN..... | 13 |
| 1. Prueba aire limpio (Clean Air Test)..... | 15 |
| 2. Prueba Aire Sucio (Dirty Air Test)..... | 16 |
| 3. Muestreo de carbón pulverizado | 19 |
| I. GENERALIDADES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA EFECTO DE ESTUDIO..... | 25 |
| 1. Descripción y ubicación de la central termoeléctrica..... | 25 |
| 2. Descripción de equipo utilizado en proceso de alimentación y pulverización de carbón..... | 25 |
| 3. Alimentador de carbón (Feeder)..... | 26 |
| 4. Sistema de aire primario y atemperación | 28 |
| 5. Pulverizador | 29 |
| V. METODOLOGÍA..... | 34 |
| A. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN..... | 34 |

| | | |
|-------|--|----|
| B. | IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE DESBALANCES DE AIRE Y CARBÓN | 34 |
| 1. | Muestreo de carbón. | 34 |
| 2. | Procedimiento de finesa de carbón pulverizado. | 35 |
| C. | DETERMINACIÓN DE EFECTOS | 36 |
| 1. | Inquemados. | 36 |
| 2. | NOx..... | 36 |
| D. | PARAMETROS DE CONTROL DE OPERACIÓN..... | 36 |
| E. | PROCESAMIENTO DE RESULTADOS..... | 37 |
| 1. | Cálculos de muestreo de carbón. | 37 |
| 2. | Cálculos de quemados L.O.I..... | 38 |
| F. | ELABORACIÓN DE GUÍA BÁSICA DE OPERACIÓN PARA CORRECCIÓN DE DESBALANCES | 39 |
| VI. | ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 40 |
| A. | RESULTADOS DE MUESTREO INICIAL | 40 |
| 1. | Pulverizador A..... | 40 |
| 2. | Pulverizador B..... | 42 |
| 3. | Pulverizador C..... | 44 |
| 4. | Inquemados (L.O.I) y Nox | 46 |
| 5. | Finesa de carbón pulverizado..... | 47 |
| B. | RESULTADOS DE MUESTREO FINAL..... | 47 |
| 1. | Pulverizador A..... | 48 |
| 2. | Pulverizador B..... | 50 |
| 3. | Pulverizador C..... | 52 |
| 4. | Inquemados (L.O.I) y Nox | 54 |
| VII. | CONCLUSIONES | 55 |
| VIII. | RECOMENDACIONES..... | 56 |
| IX. | BIBLIOGRAFÍA..... | 57 |
| X. | ANEXOS | 59 |
| A. | ANEXO 1 | 59 |
| 1. | Método de muestreo y finesa de carbon pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.O1 | 59 |
| B. | ANEXO 2..... | 73 |
| 1. | Procedimiento de mesh de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.12.R1 | 73 |
| C. | ANEXO 3..... | 78 |
| 1. | Método para obtener la ceniza en la muestra de análisis de carbón | 78 |
| D. | ANEXO 4..... | 82 |
| 1. | Guía básica de operación para corrección de desbalances..... | 82 |

| | | |
|-----|--|----|
| E. | ANEXO 5 | 90 |
| 1. | Formulario PG.04.COAL-LAB.02.01 | 90 |
| F. | ANEXO 6 | 91 |
| 1. | Hoja de resultados-Análisis de Mesh del Carbón | 91 |
| G. | ANEXO 7 | 93 |
| 1. | Certificado de muestreo y análisis del carbón | 93 |
| XI. | GLOSARIO | 96 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Clasificación de los carbones según rango | 7 |
| Tabla 2 Desviación de flujo de aire inicial de pulverizador A..... | 40 |
| Tabla 3 Desviación de flujo de combustible inicial de pulverizador A..... | 41 |
| Tabla 4 Desviación de flujo de aire inicial de pulverizador B..... | 42 |
| Tabla 5 Desviación de flujo de combustible inicial de pulverizador B..... | 43 |
| Tabla 6 Desviación de flujo de aire inicial de Pulverizador C | 44 |
| Tabla 7 Desviación de flujo de combustible inicial de pulverizador C | 45 |
| Tabla 8 Resultados de inquemados (L.O.I) y Nox iniciales | 46 |
| Tabla 9 Resultados de finesa del pulverizador A | 47 |
| Tabla 10 Resultados de finesa del pulverizador B | 47 |
| Tabla 11 Resultados de finesa del pulverizador C | 47 |
| Tabla 12 Desviación de flujo de aire final de pulverizador A | 48 |
| Tabla 13 Desviación de flujo de combustible final de pulverizador A | 49 |
| Tabla 14 Desviación de flujo de aire final de pulverizador B..... | 50 |
| Tabla 15 Desviación de flujo de combustible final de pulverizador B | 51 |
| Tabla 16 Desviación de flujo de aire final de pulverizador C..... | 52 |
| Tabla 17 Desviación de flujo de combustible final de pulverizador C | 53 |
| Tabla 18 Resultados de inquemados (L.O.I) y Nox final | 54 |
| Tabla 19 Desviación de flujo de combustible pulverizador A | 83 |
| Tabla 20 Posiciones y bloqueos de tubos..... | 85 |
| Tabla 21 Desviación de flujo de combustible pulverizador C | 86 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Central térmica | 5 |
| Figura 2 Pulverizador de martillos o impacto | 10 |
| Figura 3 Quemador horizontal clásico | 12 |
| Figura 4 Prueba de aire limpio (Clean Air) | 15 |
| Figura 5 Gráfico de análisis prueba aire limpio | 16 |
| Figura 6 Prueba aire sucio (Dirty Air Test) | 17 |
| Figura 7 Gráfico de análisis prueba aire sucio | 18 |
| Figura 8 Muestras de carbón pulverizado | 19 |
| Figura 9 Muestreador isocinético de carbón | 20 |
| Figura 10 Gráfico de análisis de flujo de combustible | 21 |
| Figura 11 Tamices ASTM | 22 |
| Figura 12 Balance de combustible | 23 |
| Figura 13 Efecto de fuerza centrífuga sobre partículas de carbón | 24 |
| Figura 14 Flujo óptimo de aire primario para pulverizadores | 24 |
| Figura 15 Alimentación y pulverización de carbón | 26 |
| Figura 16 Alimentador gravimétrico | 27 |
| Figura 17 Damper | 27 |
| Figura 18 Sistema de aire primario y atemperación | 28 |
| Figura 19 Pulverizador Atrita 558D Duplex | 29 |
| Figura 20 Sección de trituración | 30 |
| Figura 21 Riffle | 31 |
| Figura 22 Mecanismo de ajuste | 31 |
| Figura 23 Mecanismo de ajuste de barras ajustables | 32 |
| Figura 24 Vista superior del riffle obstruyendo lado norte | 33 |
| Figura 25 Vista superior del riffle obstruyendo lado norte | 33 |
| Figura 26 Flujo de aire inicial de pulverizador A | 40 |
| Figura 27 Flujo de combustible inicial de pulverizador A | 41 |
| Figura 28 Flujo de aire inicial de pulverizador B | 42 |
| Figura 29 Flujo de combustible inicial de pulverizador B | 43 |
| Figura 30 Flujo de aire inicial de pulverizador C | 44 |
| Figura 31 Flujo de combustible inicial de pulverizador C | 45 |
| Figura 32 Flujo de aire final de pulverizador A | 48 |
| Figura 33 Flujo de combustible final de pulverizador A | 49 |
| Figura 34 Flujo de combustible final de pulverizador B | 50 |
| Figura 35 Flujo de combustible final de pulverizador B | 51 |
| Figura 36 Flujo de aire de aire final de pulverizador C | 52 |
| Figura 37 Flujo de combustible final de pulverizador C | 53 |

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se presenta un estudio sobre los desbalances de la mezcla aire y carbón que ocurren en las tuberías que transportan esta mezcla desde un pulverizador hacia los quemadores de una caldera de tipo acuotubular para su combustión, en una central termoeléctrica de Escuintla ubicada en el municipio de Masagua. Durante la investigación se estableció que la forma de determinar la existencia de los desbalances es a través de la ejecución del muestreo isocinetico del carbón pulverizado. Asimismo se comprobó que los principales efectos que provocan dichos desbalances son a) Inquemados en las tuberías con excesivo carbón y; b) Óxido de Nitrógeno – Nox en las tuberías con excesivo aire.

Por lo antes indicado se describen los procedimientos desarrollados por las normas ASTM, en las cuales se muestran las fórmulas establecidas para determinar tanto los desbalances como sus principales efectos. Asimismo se determinan los parámetros de operación empleados por la unidad generadora para el control de desbalances, como de quemados y Nox, mostrando el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos durante la investigación concluyendo a partir de los parámetros mencionados. Finalmente como aporte de esta investigación se realizó una guía básica de operación con la finalidad de transferir a un documento escrito el procedimiento empleado para la corrección de desbalances por parte del ingeniero de operaciones de la unidad.

I. INTRODUCCIÓN

En las centrales termoeléctricas que queman carbón pulverizado, se presentan problemas de desbalances de aire y carbón en las tuberías que transportan esta mezcla desde los pulverizadores hacia los quemadores de una caldera para su combustión. El comportamiento de dicha mezcla es muy dependiente de factores como el tamaño de las partículas de carbón, la velocidad del flujo de aire y la resistencia del sistema entre cada tubo de combustible.

La solución al problema de desbalances es la medición del flujo de carbón de forma isocinética mediante la extracción de una muestra representativa a través de muestreos de carbón que permita diagnosticar problemas en el pulverizado y la distribución del carbón en las tuberías de los pulverizadores, por lo que la finalidad del presente trabajo es determinar los desbalances que se presentan en la unidad generadora objeto de estudio identificando el método empleado para su detección, los parámetros de operación utilizados para el control de los mismos y finalmente evaluando los efectos de inquemados y Nox que son provocados por dichos desbalances.

La investigación realizada fue de tipo cuantitativa, bajo un alcance descriptivo de tipo experimental, la recopilación de datos se llevó a cabo mediante la participación en muestreos de carbón realizados en la unidad generadora objeto de estudio, efectuando los análisis correspondientes junto al ingeniero de operaciones para la interpretación y corrección de los mismos.

Con el fin de comprender mejor el tema, en el marco teórico se abordan temas como que es una central termoeléctrica, el carbón, su clasificación y sus propiedades, asimismo se define que es la combustión, el sistema de combustión directa de carbón pulverizado, los pulverizadores y su clasificación, el transporte de carbón pulverizado, como los quemadores y sus tipos, teorías de desbalances de la mezcla aire-carbón y finalmente la descripción general de la central termoeléctrica objeto de estudio como la descripción del equipo utilizado en el proceso de alimentación y pulverización del carbón.

En el marco metodológico se describe como se obtuvieron los datos, siendo los procedimientos desarrollados por las normas ASTM los utilizados para ello. Para los muestreos de carbón, se realizó el establecido por la norma ASTM D 1997-87 denominada como método de muestreo de carbón pulverizado, para obtener el porcentaje de inquemados se realizó el establecido por la norma ASTM D 3174-97 denominado como Método para obtener la ceniza en

la muestra de análisis de carbón y para la lectura del Nox se utilizó una maleta analizadora de gases. Asimismo se describen los parámetros de control de operación utilizados por la unidad para el control tanto de desbalances como de inquemados y Nox describiendo posteriormente el procesamiento de resultados en el que se detallan las formulas empleadas para la determinación tanto de desbalances como sus efectos de inquemados y Nox.

En el análisis e interpretación de resultados se presentan los resultados obtenidos de los muestreos iniciales en los que se determinó la presencia de desbalances en los tres pulverizadores, apoyándose para su interpretación en gráficas generadas a partir del procesamiento de los datos obtenidos. De igual manera se presentan los resultados de inquemados y Nox generados en la fecha inicial del muestreo. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos de los muestreos finales luego de haber realizado los ajustes mecánicos necesarios en los que se consideró como balanceados los flujos de carbón en los tubos de los tres pulverizadores, asimismo se presentan los resultados de inquemados y Nox obtenidos comprobando que el tener balanceado los flujos de combustible en cada línea del pulverizador disminuye el porcentaje de inquemados en la caldera y a pesar de no haber obtenido la finesa deseada en todos los tubos la unidad cumple con niveles aceptables de Nox.

Finalmente para realizar el análisis, interpretación y corrección de los desbalances como un aporte de esta investigación, se elaboró una guía de corrección de desbalances de aire y carbón con el objetivo de transferir a un documento escrito el procedimiento empleado por el ingeniero de operaciones.

II. OBJETIVOS

A. General

- Determinar los desbalances de la mezcla de aire primario y carbón pulverizado en los tubos que conducen dicha mezcla hacia los quemadores de la caldera para su combustión evaluando los efectos de inquemados y NOX.

B. Específicos

- Determinar la metodología empleada para la medición del flujo de carbón en las tuberías de los pulverizadores.
- Determinar los parámetros de desbalance de desviación de velocidad del flujo de aire y del flujo de combustible entre cada línea separada del pulverizador.
- Determinar los parámetros de operación empleados por la Unidad Generadora para el control de finesa, inquemados y NOX.
- Identificar factores que pudiesen afectar la metodología empleada para la medición del flujo de carbón en las tuberías de los pulverizadores.
- Elaborar una guía básica con las principales normas de operación para los ajustes de desbalance del flujo aire-carbón en las tuberías que unen los pulverizadores (molinos) con los quemadores de una caldera.
- Capacitar al personal operativo en el manejo de una guía de operación para los ajustes de desbalance del flujo aire-carbón en los tubos de un pulverizador.

III. JUSTIFICACIÓN

La central termoeléctrica objeto de estudio se utiliza como una planta de carga base, la cual opera con una disponibilidad anual de aproximadamente el 98%, generando 134 MW/h para cumplir con el acuerdo de compra de energía con la empresa de distribución local. La planta opera con una eficiencia global de 10,800 BTU/kWh, generando cerca de 1,000 GWh al año, lo que implica que a plena carga consume alrededor de 1300 toneladas de carbón por día.

El carbón es pulverizado y se mezcla con aire primario para ser transportado en las tuberías desde los pulverizadores hacia los quemadores de la caldera para su combustión. Durante este proceso se presentan desbalances de esta mezcla en los tubos de los pulverizadores, lo que plantea grandes retos para la Central Termoeléctrica objeto de estudio, pues una mala distribución del carbón pulverizado causa ineficiencia en la combustión y problemas ambientales. De tal cuenta, se ocasionan inquemados en las tuberías con excesivo carbón lo que se traduce en pérdidas económicas y Nox en las tuberías con excesivo aire el cual es un contaminante para el medioambiente.

Por lo antes indicado, la problemática de los desbalances es de gran preocupación para la Central Termoeléctrica y es por ello que es importante la realización de la presente investigación, en la cual se recogen las diferentes teorías desarrolladas alrededor de dicha problemática, se describen los procedimientos y parámetros de control y operación empleados así como los mecanismos de ajuste y corrección que son aplicados de forma periódica con el propósito de mantener balanceados los tubos.

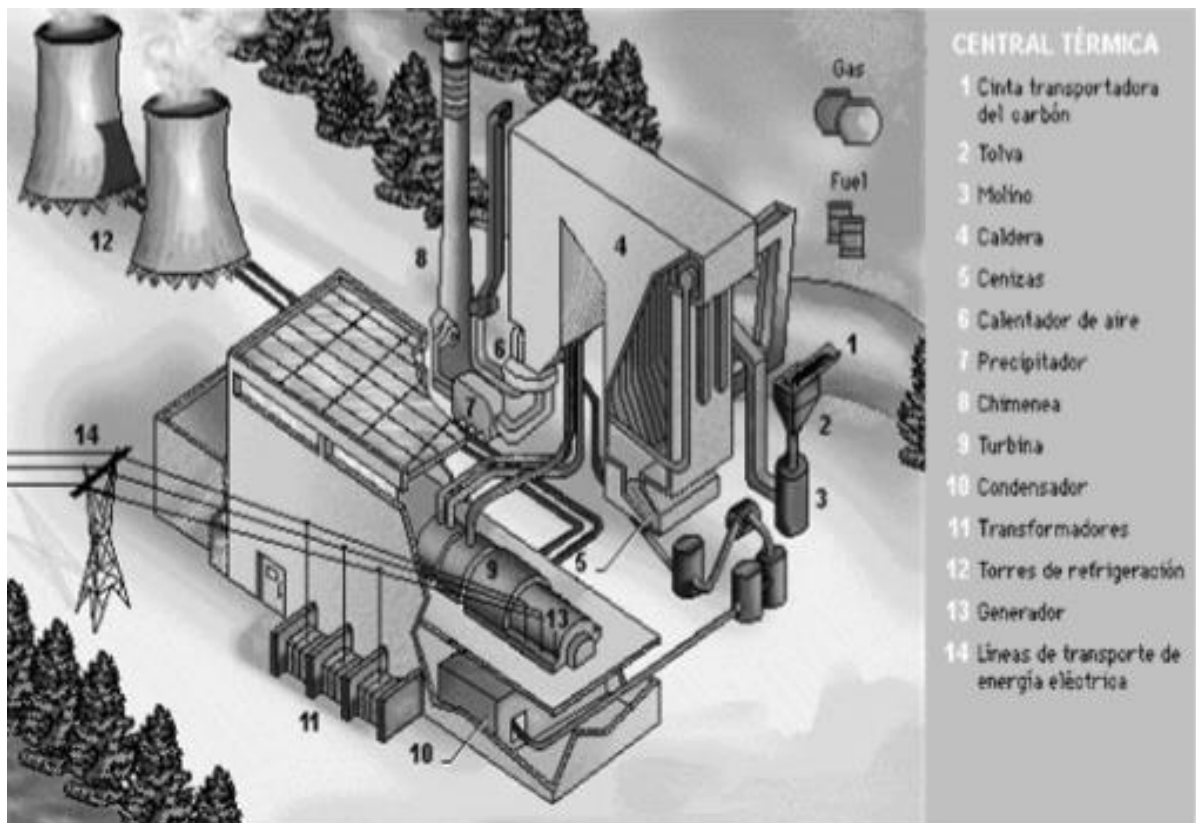
Al poder controlar y mantener los desbalances dentro de los parámetros de operación aceptables, se consigue reducir los efectos de inquemados y NOX y además una mayor eficiencia de la caldera.

IV. MARCO TEÓRICO

A. CENTRAL TERMOELÉCTRICA.

Una central termoeléctrica o planta termoeléctrica es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, generalmente mediante la combustión de combustibles fósiles tales como gas natural, derivados del petróleo y carbón. Dicho calor es empleado dentro de un ciclo termodinámico para mover una turbina y finalmente producir energía eléctrica. La Figura 1 ilustra un diagrama básico de una central térmica. (Garduño Sánchez, s.f).

Figura 1. Central térmica



Fuente: (Renove Tecnología, S.L., 2013).

B. COMBUSTIBLES FÓSILES.

Son sustancias procedentes de restos vegetales y otros organismos vivos (como plancton) que hace millones de años fueron sepultados por efecto de grandes cataclismos o fenómenos naturales y por la acción de microorganismos, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. (Hervás, s.f)

C. CARBÓN.

El carbón es la segunda fuente de energía más utilizada representando el 32% del total de energía utilizada en el mundo. (Prieto, s.f)

Son, sin duda, los combustibles fósiles más complejos. Se trata de rocas sedimentarias heterogéneas originadas a partir de restos vegetales muy diversos, sometidos a altas presiones, elevaciones de temperatura y movimientos de la corteza terrestre. Como resultado de este largo y complicado proceso, en las minas de carbón se encuentran, junto con los productos procedentes de vegetales, restos minerales ajenos que contribuyen a aumentar la variedad y calidad de los carbones. (Delso Martin, 2001)

1. **Clasificación.** El sistema de clasificación más utilizado es el establecido por la sociedad americana de pruebas y ensayos (ASTM). Tomando como criterios principales de clasificación el rango de carbón, el contenido de materias volátiles y carbono fijo, ilustrados en la Tabla 1 según el método ASTM D388.

Tabla 1 Clasificación de los carbones según rango

| Clase | Grupo | Carbono Fijo, % s/(seco y sin Cenizas) | | Materias Volátiles, % s/(seco y sin Cenizas) | | Poder Calorífico, kJ/kg s/(Húmedo ^b y sin Cenizas) | | Carácter aglomerante |
|--------------------|---|---|-----------|---|----------------------|--|----------------|---|
| | | Igual o Mayor que | Menor que | Mayor que | Igual o Menor que | Igual o Mayor que | Menor que | |
| I. Antracita | 1. Metaantracita | 98 | - | - | 2 | | | No Aglomera |
| | 2. Antracita | 92 | 98 | 2 | 8 | | | |
| | 3. Semiantracita ^c | 86 | 92 | 8 | 14 | | | |
| II. Bituminoso | 1. Carbón Bituminoso Bajo Volátiles | 78 | 86 | 14 | 22 | | | Generalmente Aglomerado ^f |
| | 2. Carbón Bituminoso Medio en Volátiles | 69 | 78 | 22 | 31 | | | |
| | 3. Carbón Bituminoso A Alto en Volátiles | - | 69 | 31 | - | 32500 ^d | | |
| | 4. Carbón Bituminoso B Alto en Volátiles | - | - | - | - | 30200 ^d | 32500 | |
| | 5. Carbón Bituminoso C Alto en Volátiles | - | - | - | - | 26700 24400 ^e | 30200 26700 | Aglomerado |
| III. Subbituminoso | 1. Carbón Subbituminoso A | - | - | - | - | 24400 | 26700 | No Aglomera |
| | 2. Carbón Subbituminoso B | - | - | - | - | 22100 | 24400 | |
| | 3. Carbón Subbituminoso C | - | - | - | - | 19300 | 22100 | |
| IV. Lignito | 1. Lignito A | - | - | - | - | 14700 | 19300 | No Aglomera |
| | 2. Lignito B | - | - | - | - | - | 14700 | |

Fuente: ASTM 388-92

a. Antracita: Es un carbón muy duro, contiene un alto porcentaje de carbono seco fijo que oscila entre el 92 a 98% y menos de 8% de materia volátil seca, su encendido es lento y requiere una fuerte corriente para lograrlo. (Poder calorífico de aproximadamente 14, 000 BTU / lb). (DB RILEY, INC, 1998)

b. Bituminoso: Es un carbón suave, contiene un alto porcentaje de materia volátil que oscila entre el 22 a 23%, el cual es una variación grande, así mismo varía en gran medida en humedad, ceniza y su contenido de azufre. (Su poder calorífico puede variar considerablemente entre 10.500 y 14.000 BTU / lb). (DB RILEY, INC, 1998).

c. Subbituminoso: Es un carbón de color negro, no coquizable, que requiere de mucha atención para su almacenaje, tienen un contenido de humedad relativamente alto (15-30%) y su contenido de materia volátil varía de 35-45%. (Poder calorífico de 9.500 BTU / lb). (DB RILEY, INC, 1998)

d. Lignito: Es el estado de transición entre la turba y el carbón sub-bituminoso y tienen una apariencia similar a la arcilla. Por lo general es muy alto en humedad - hasta 45% su materia volátil pueden variar entre 25 y 45%. (Valor calórico por lo general por debajo de 8.500 BTU / lb). (DB RILEY, INC, 1998)

2. **Propiedades.** Existen ciertas propiedades del carbón muy importantes que reciben atención para su combustión como lo son su poder calorífico, contenido de azufre, contenido de ceniza, la temperatura de fusión de la ceniza, y la capacidad de molienda, las cuales se describen a continuación.

a. **Poder calorífico:** Es uno de los principales parámetros característicos de todo carbón. Es definido como la cantidad de calor que se libera cuando la unidad de masa de un carbón en condiciones normalizadas es quemado, es medido en BTU/lb. (Cortés, s.f)

b. **Contenido de azufre:** Son partes indeseables de los combustibles, dichas partes contaminan el medio ambiente y forman subproductos corrosivos que provocan deterioro de partes en la caldera, sino son tratados adecuadamente. (DB RILEY, INC, 1998)

c. **Contenido de ceniza:** Es importante y de mucha preocupación, no solo la cantidad de ceniza propia del carbón sino la composición química de la misma, la ceniza no sólo formará depósitos aislante sobre las superficies de la caldera, sino también, si contiene elementos nocivos, atacar y corroer los tubos que funcionan a altas temperaturas. (DB RILEY, INC, 1998)

d. **Fusión de temperatura de la ceniza:** Es una propiedad importante a tener en cuenta debido a que ayuda a determinar cuál es la probabilidad de que exista contaminación dentro del hogar, dicho factor es importante en el diseño de calderas de carbón despedido. (DB RILEY, INC, 1998)

e. **Capacidad de molienda:** Se define como la facilidad relativa de pulverización de un determinado carbón, calderas industriales pulverizan carbón hasta una finura de polvo de talco, de esta manera permite que el carbón se queme más fácilmente y de forma completa. (DB RILEY, INC, 1998)

D. COMBUSTIÓN.

Es un proceso mediante el cual sustancias (Combustibles) capaces de reaccionar con el oxígeno (Oxidante), interactúan con este generando calor. Dentro de las sustancias más comunes se encuentran los hidrocarburos, los cuales a través de la combustión son capaces de generar energía. (Benitez, Calderon, Escate, 2004).

1. **Sistema de combustión directa de carbón pulverizado.** Es aquel que permite la utilización continua del carbón bruto, directamente desde las tolvas de alimentación. El carbón pasa de la tolva de alimentación a un alimentador dosificador, el cual extrae de la tolva la cantidad de carbón correspondiente a la potencia necesaria en determinado momento. (Prieto, Ismael, s.f)

El carbón cae directamente desde el alimentador hacia el pulverizador, en el cual se seca el carbón y se tritura hasta alcanzar la granulometría necesaria para la combustión. Asimismo por el pulverizador fluye una corriente de aire primario que además de secar el carbón, una vez molido, lo arrastra en suspensión por las tuberías que van desde los molinos a los quemadores, hasta inyectarlo al hogar por medio de los quemadores. (Prieto, Ismael, s.f)

El aire caliente de secado y arrastre es el aire primario, este es suministrado a la caldera por un sistema de ventiladores llamados ventiladores de aire primario, el aire que manipulan dichos ventiladores debe de pasar por algún tipo de calentador que eleve su temperatura a valores adecuados para conseguir el secado del carbón y que a su vez la mezcla aire-carbón salga del pulverizador a una temperatura entre 60 y 110 °C. (Prieto, Ismael, s.f)

Los quemadores son los elementos por donde se inyecta en el hogar la mezcla de aire primario y carbón, asimismo cumplen con la misión de inyectar el aire secundario rodeando a la mezcla anterior, de tal manera que se mezcle homogéneamente con el chorro de carbón y aire primario y de esta forma obtener una buena combustión. (Prieto, Ismael, s.f)

E. PULVERIZADORES.

El carbón, por su parte, necesita una buena pulverización, la cual se consigue mediante una correcta disposición y funcionamiento de los elementos de molienda de los pulverizadores. En los pulverizadores se establece una circulación interna que obliga al carbón a pasar varias veces por los elementos de molienda, hasta que se alcance una finura tal que un sistema de clasificación permita su salida del molino hacia los quemadores. Los principios empleados en la pulverización son, impacto, presión, fricción o una combinación de ellos, esto dependiendo del tipo de carbón a utilizar. (Prieto, Ismael, s.f)

Para obtener una adecuada manipulación neumática del carbón finamente pulverizado, es necesario que tenga un grado de secado tal que esté en forma de pulverulenta. Este secado se realiza mientras el carbón circula y se muele. La temperatura de la mezcla aire-carbón debe controlarse en un valor tal que no haya peligro de fuego antes de entrar a la caldera. (Prieto, Ismael, s.f)

La circulación del carbón, dentro del pulverizador, se necesita para que tenga lugar un rápido, secado, esto con el fin de mantener cargadas las superficies de molienda y para evacuar el material pulverizado. Para la obtención de dicha circulación se combinan los efectos de fuerza centrífuga, gravedad y circulación de aire. (Prieto, Ismael, s.f).

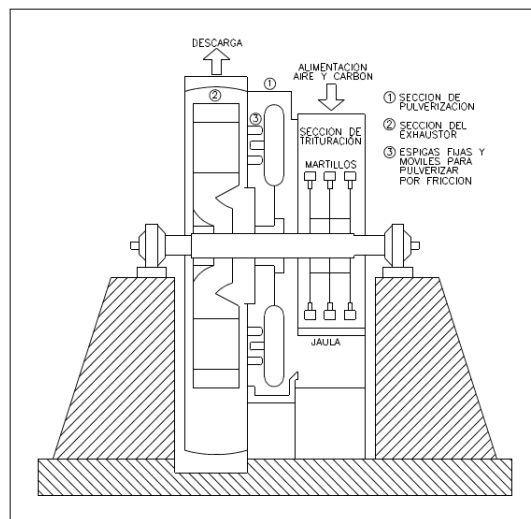
La velocidad en las líneas desde el molino hasta los quemadores, debe ser lo bastante alta para impedir la deposición del carbón. Cuando, dentro de los límites permitidos, disminuye el caudal de aire, el caudal de carbón también lo hace, por tanto aumenta la proporción de finos a la salida del molino. (Prieto, Ismael, s.f)

A la salida de cada molino se sitúa un distribuidor, el cual hace que la mezcla aire-carbón se reparta entre distintas líneas que van de un molino hacia los quemadores de la caldera, manteniendo en todas ellas la misma cantidad de dicha mezcla. (Prieto, Ismael, s.f)

1. Clasificación. Hoy en día existe una gran cantidad de tipos de pulverizadores, estos pueden ser de baja, mediana y de alta velocidad, asimismo se clasifican en pulverizadores verticales y horizontales. Para efecto de estudio de la presente investigación se hará referencia únicamente al pulverizador horizontal de martillos o impacto, debido a que es el utilizado por parte de la unidad generadora objeto de estudio.

a. Pulverizador horizontal de martillos o impacto. En la Figura 2 se observa un diagrama general de un pulverizador de martillos o impacto, el cual consta de un conjunto de martillos fijos o articulados que giran en una cámara revestida con placas de fundición anti desgaste. (Prieto, Ismael, s.f)

Figura 2 Pulverizador de martillos o impacto



Fuente: (Prieto, Ismael, s.f)

Este molino funciona a unas 600 rpm y muele fundamentalmente por impacto y rozamiento. El carbón que ingresa por la sección de trituración es reducido inicialmente antes de entrar a la sección de fricción en donde este tiene que circular entre un conjunto de espigas fijas y móviles que son las que conceden al molino la característica de molienda por fricción. Finalmente el carbón pasa a la sección de aspiración el cual consta de un ventilador exhaustor diseñado para impulsar la mezcla aire-carbón hacia los quemadores de la caldera. (Prieto, Ismael, s.f)

A diferencia de la mayoría de pulverizadores verticales, el pulverizador horizontal carece de clasificador. La clasificación del carbón se realiza por efecto de la fuerza centrífuga que mantiene las fricciones más gruesas circulando próximas a la periferia, mientras que las más finas alcanzan la parte central que es donde está el paso de la zona de pulverización a la zona de aspiración. (Prieto, Ismael, s.f)

Dentro de las características más importantes a tener en cuenta respecto a este tipo de pulverizador, está la cantidad de humedad admitida del carbón la cual es del 20%, esto debido al bajo tiempo de residencia del carbón. Asimismo por la baja calidad del carbón que manipulan, las cantidades de éste, tienen que ser enormes por lo que suelen ser máquinas de tamaños muy grandes. (Prieto, Ismael, s.f)

F. TRANSPORTE DE CARBÓN PULVERIZADO.

El transporte del carbón pulverizado procedente del pulverizador hacia los quemadores, se realiza en suspensión en la corriente de aire primario, a través de tuberías de fundición de alta dureza o revestidas interiormente de material anti desgaste. (Prieto, Ismael, s.f)

La mezcla aire-carbón es impulsada mediante los ventiladores de tiro forzado, en el caso del uso de pulverizadores horizontales de martillo o impacto, estos cuentan con un ventilador extractor (exhaustor) a la salida del mismo, el cual aspira el aire procedente de los ventiladores de tiro forzado tomado posteriormente a través del sistema de calentamiento, el cual cumple con la función de secado y arrastre de donde pasa ya con el carbón en suspensión al exhaustor encargado de llevar dicha mezcla a los quemadores de la caldera. (Prieto, Ismael, s.f)

El exhaustor por su parte cuenta con la desventaja de que al manipular el carbón, el cual contiene partes abrasivas, provoca desgastes fuertes en el mismo, obteniendo como resultado una disminución de rendimiento. (Prieto, Ismael, s.f)

Por su parte el aire secundario, el cual procede de la caja de vientos, se inyecta rodeando el tubo de inyección de aire primario y carbón a través de un dispositivo de paletas regulables inclinables, que aparte de regular la cantidad de aire, varia la rotación con la que se inyecta. Los dos flujos acoplados producen un movimiento con fuerte turbulencia que se prolonga dentro de la cámara de combustión una distancia igual a varias veces el diámetro de la tobera del quemador. (Prieto, Ismael, s.f)

Este tipo de quemadores van colocados en filas, situados en varios niveles y pueden ir en pared frontal, en este tipo de quemadores casi toda la combustión debe de tener lugar dentro de la zona donde se mantiene la turbulencia que imprime el propio quemador, para ello la relación aire combustible debe de mantenerse en los límites adecuados en cada quemador, tal como si se tratara de una sola llama, sin tener en cuenta los aportes del resto de quemadores. (Prieto, Ismael, s.f)

H. DESBALANCES DE AIRE-CARBÓN

Como se indicó anteriormente a la salida de cada molino se sitúa un distribuidor, el cual hace que la mezcla aire-carbón se reparta entre los distintos tubos que van de un molino hacia los quemadores de la caldera, manteniendo la misma cantidad de dicha mezcla en los distintos tubos, a esta mezcla se le suele llamar flujo de aire sucio.

Existen principalmente tres factores por los cuales el flujo de aire sucio no se distribuye en una correcta proporción entre los distintos tubos que conducen dicho flujo a los quemadores de la caldera, los cuales son: el flujo de combustible, la velocidad del flujo de aire y la fineza del carbón.

Cada sistema de calderas debe estar debidamente afinado para trabajar con carbón pulverizado y el proceso comienza con poner la cantidad correcta de combustible con la cantidad correcta de aire en el quemador. (Dick Storm PE, 2011)

La afinación de una caldera de carbón pulverizado comienza con el balanceo de los flujos de aire y carbón en los tubos que transportan esta mezcla a los quemadores. La forma correcta para balancear dichos flujos es establecer un rendimiento de referencia de la unidad mediante una correcta medición del flujo de combustible, el flujo de aire y la fineza del carbón. (Dick Storm PE, 2011)

Las tolerancias aceptadas como estándares industriales para el balanceo de combustible y aire se describen a continuación. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

- Balance de $\pm 5\%$ de desviación en el flujo de aire sucio entre cada línea separada del pulverizador.
- Balance de $\pm 10\%$ de desviación en el flujo de combustible entre cada línea separada del pulverizador.

Al mantener un balanceo óptimo entre el combustible y el aire se consigue lo siguiente: (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

- Obtención de niveles aceptables de inquemados en ceniza.
- Liberación y absorción uniformes de calor a través de horno.
- Reducción de la escoria del horno y ensuciamientos.
- Mantener las temperaturas de los gases del horno y de la caldera dentro de las tolerancias de diseño.
- Prevención de desperdicios en las paredes de agua y sobrecalentamiento de los tubos.

Existen numerosas variables controlables que afectan directamente la distribución de aire y combustible entre las líneas separadas de los pulverizadores, dentro de las cuales destacan los descritos a continuación. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

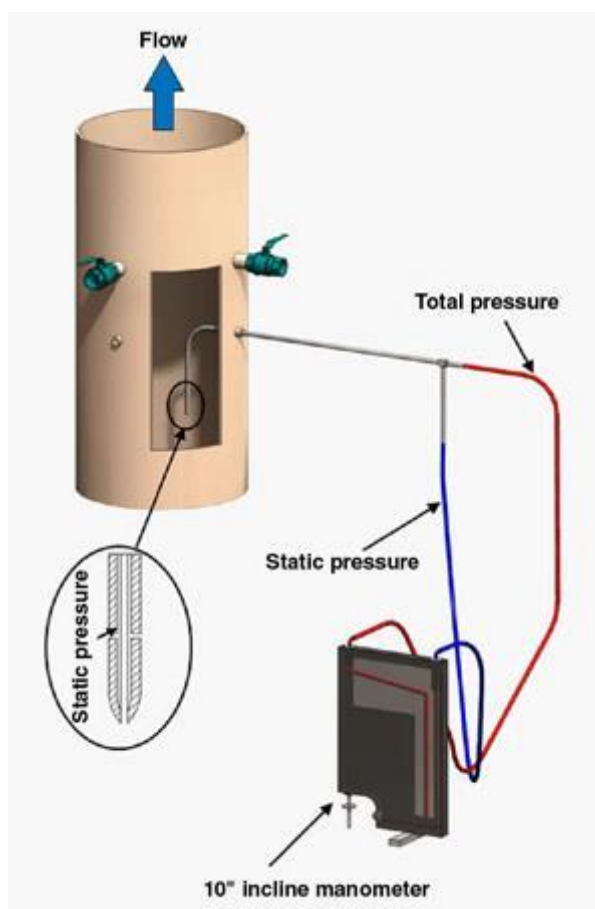
- Tamaño de las partículas de carbón pulverizado (Fineza).
- Resistencia del sistema entre cada conducto de combustible.
- Flujo de aire total a través del pulverizador.
- Velocidad de la mezcla aire-carbón que pasa por cada línea del quemador.
- Mantenimiento de componentes críticos como clasificadores, rifles, conos clasificadores, placas de orificios y componentes del quemador.

Los procedimientos utilizados para llevar a cabo las mediciones antes mencionadas se alcanzan mediante la realización principalmente de tres pruebas que son: prueba aire limpio, prueba aire sucio y muestreo de carbón pulverizado.

1. Prueba aire limpio (Clean Air Test). Para establecer la velocidad de resistencia del sistema entre cada línea de los quemadores es necesario realizar la prueba aire limpio, dicha prueba a su vez se realiza con el objetivo de asegurar la velocidad mínima de la línea de combustible que se debe de mantener después de la optimización del flujo de aire primario para mejorar la estabilidad de la llama de los quemadores a cargas más bajas y reducir las paradas de la línea de combustible. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Las líneas de combustible deben comenzar con el $\pm 2\%$ o mejor balanceo de las velocidades del aire limpio. La prueba de aire limpio llevada a cabo en cada tubería de carbón se completa con mediciones de puntos múltiples (usualmente 24 puntos de áreas iguales) usando un tubo pitot estándar (Ver Figura 4). Los promedios de velocidades de los 24 puntos antes mencionados se trazan en un gráfico para facilitar su análisis (Ver Figura 5). Es importante mencionar que las pruebas de aire limpio deben realizarse bajo condiciones de flujo constante con temperaturas del sistema completamente estables. (Dick Storm PE, 2011)

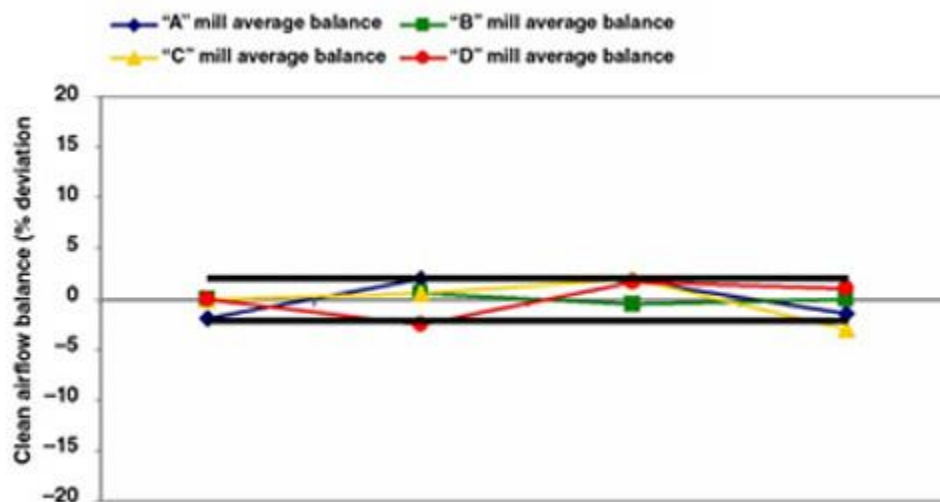
Figura 4 Prueba de aire limpio (Clean Air)



Fuente: (Dick Storm PE, 2011)

El tubo pitot estándar está diseñado para medir el flujo de aire limpio de los tubos de carbón a través en una rejilla interna de la misma de al menos 24 mediciones individuales que representan las mismas áreas de flujo. Esta medición se lleva a cabo sin carbón pulverizado, por tal razón se le suele llamar prueba de aire limpio. (Dick Storm PE, 2011).

Figura 5 Gráfico de análisis prueba aire limpio



Fuente: (Dick Storm PE, 2011)

En la Figura 5 se aprecia un ejemplo del gráfico de análisis de la prueba aire limpio, las dos líneas negras representan el $\pm 2\%$ del rango de tolerancia aceptada establecido por la prueba, mientras que las líneas azul, amarillo, verde y roja representan las velocidades de aire que fluyen a cada molino.

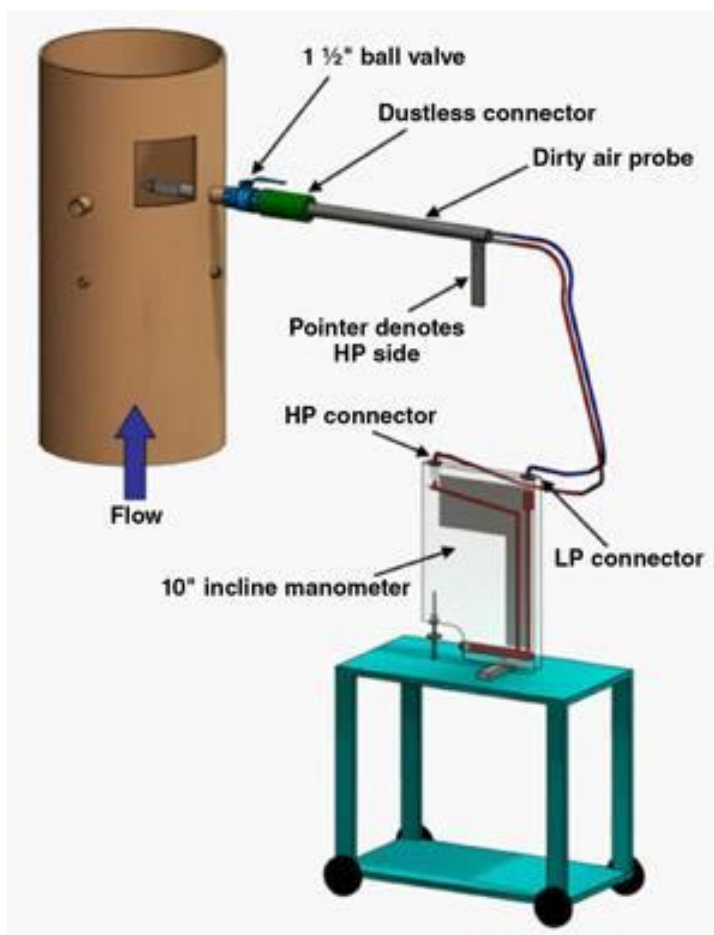
El balanceo del aire limpio es un requisito previo obligatorio para equilibrar el flujo de carbón entre las tuberías de carbón. Idealmente, las velocidades de aire limpio deben de estar dentro del rango del $\pm 2\%$ de la media antes indicado, lo cual representa un buen punto de partida para el balanceo de los tubos; sin embargo esto, no garantiza el balanceo del combustible. El balanceo de combustible depende del suministro de cantidades iguales de carbón pulverizado a cada tubo de carbón individual. (Dick Storm PE, 2011)

2. Prueba aire sucio (Dirty Air Test). Las velocidades de aire sucio deben medirse en cada línea de combustible con el objetivo de establecer la tasa de muestreo adecuada para la toma de muestras isocinética y para determinar el flujo de aire en cada tubería de combustible. (Storm Technologies, Inc., 2004)

Las mediciones de la velocidad de aire sucio se realizan mediante la utilización de la sonda de aire sucio (Dirty Air Probe). Dicha sonda es un dispositivo probado que permite la medición del flujo de aire en un ambiente cargado de polvo con el mínimo riesgo de paro de la misma. (Storm Technologies, Inc., 2004)

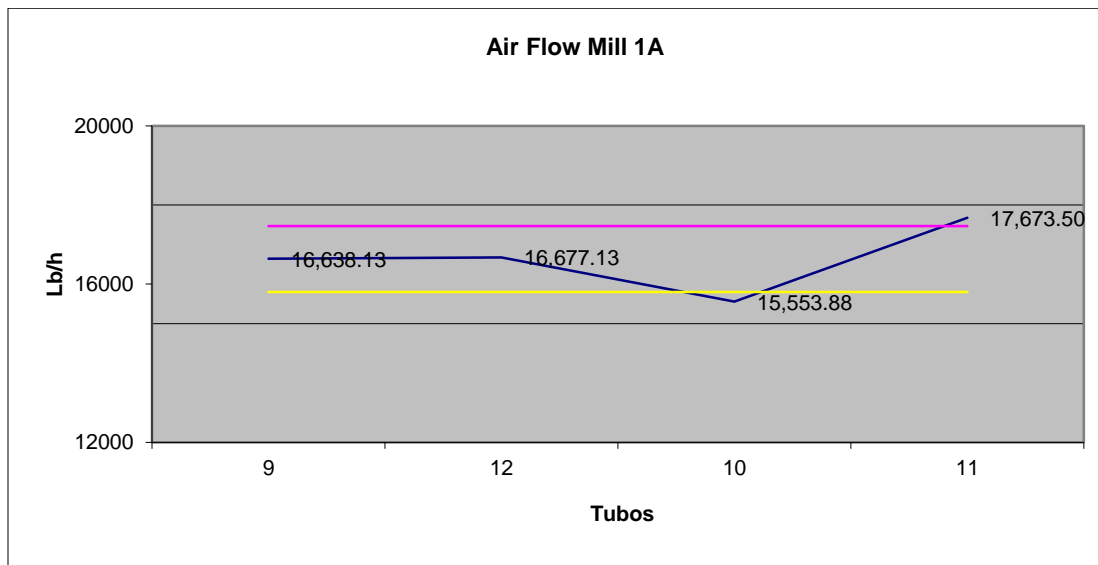
Las velocidades de aire sucio de cada tubería deben estar dentro del $\pm 5\%$ de la media de todas las tuberías de carbón para lograr un flujo de combustible uniforme. La prueba de aire sucio llevada a cabo en cada tubería de carbón al igual que la prueba de aire limpio se completa con mediciones de puntos múltiples (usualmente 24 puntos de áreas iguales establecidos por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ASME) usando la sonda de aire sucio antes indicada, en dos puertos de muestreo. (Ver Figura 6). Los flujos de aire obtenidos a través de los promedios de velocidades de aire sucio de los 24 puntos antes mencionados se trazan en un gráfico para facilitar su análisis (Ver Figura 7). (Dick Storm PE, 2011)

Figura 6 Prueba aire sucio (Dirty Air Test)



Fuente: (Dick Storm PE, 2011)

Figura 7 Gráfico de análisis prueba aire sucio



Fuente: Unidad Generadora 2016

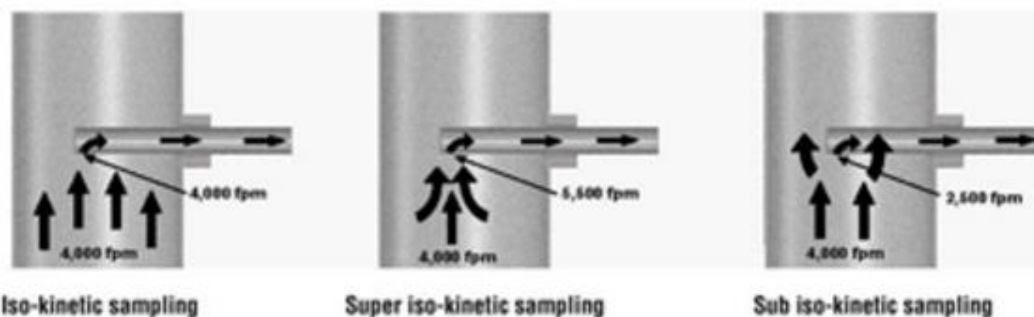
En la Figura 7 se aprecia un ejemplo del gráfico de análisis de la prueba de aire sucio, la línea rosa y la línea amarilla representan el $\pm 5\%$ de desviación de la tolerancia aceptable como estándar industrial del flujo de aire, mientras que la línea azul representa los flujos de aire de las velocidades de aire sucio que fluyen en cada tubo de los molinos.

Idealmente las velocidades de aire sucio deben de estar dentro del rango del $\pm 5\%$ del rango de tolerancia aceptable. Cuando las velocidades de aire sucio no están balanceadas en cada tubería, normalmente el flujo de combustible tampoco lo está, comúnmente bajas velocidades de aire sucio suelen estar acompañadas de grandes cantidades de carbón, estas bajas velocidades se atribuyen a la energía adicional requerida para transportar la corriente de carbón más pesada y densa a través de las tuberías de combustible, es decir partículas de carbón más gruesas. (Dick Storm PE, 2011).

Esta es la razón por la que las líneas de combustible se balancean primero con la prueba de aire limpio y luego con la prueba de aire sucio y la medición de la finura del carbón, mediante el muestreo de carbón pulverizado. Cuando los flujos de combustible son uniformes para cada entrada de tubería de carbón, y las tuberías han sido balanceadas previamente para resistencias similares del sistema, entonces las velocidades del aire sucio tienden a estar dentro del $\pm 5\%$ de la velocidad media del aire de la tubería de carbón. (Dick Storm PE, 2011).

3. Muestreo de carbón pulverizado. Como parte del proceso habitual de garantizar un sistema balanceado de carbón pulverizado, es necesario recolectar muestras reales de carbón procedentes de cada tubería de carbón, como se aprecia en la Figura 8. (Dick Storm PE, 2010)

Figura 8 Muestras de carbón pulverizado



Fuente: (Dick Storm PE, 2010)

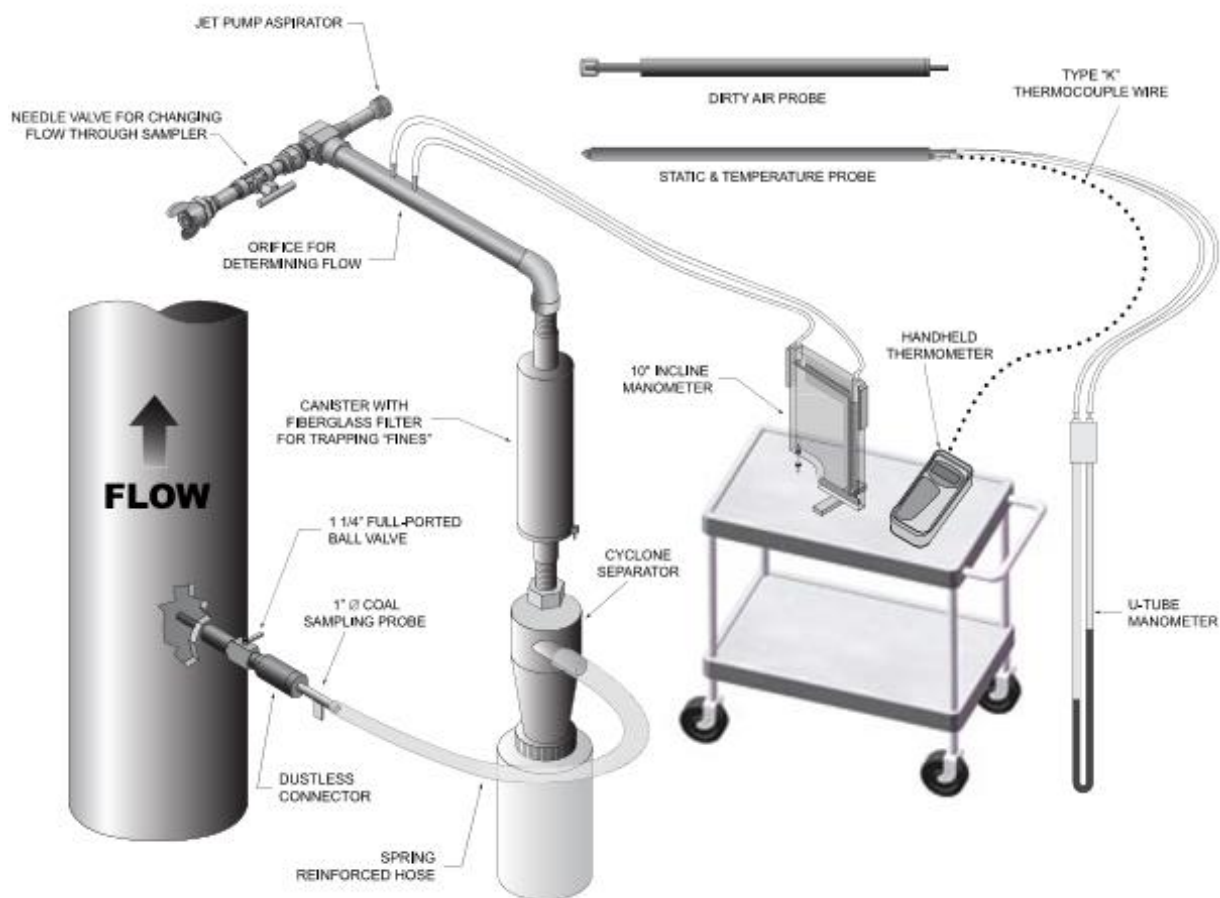
Existen tres métodos de muestreo de carbón pulverizado, el muestreo isocinético (izquierda) recoge las partículas que fluyen en el muestreador a la misma velocidad que el carbón que fluye a través de la tubería y representa mejor las condiciones reales de funcionamiento. El muestreo super isocinético (centro) contiene partículas atrapadas en el muestreador a una velocidad mayor que la velocidad en la tubería. Por último el muestreo sub isocinético (derecha) contiene partículas separadas de la punta del muestreador debido a su obstrucción, y las partículas que entran en el tubo de muestra fluyen a una velocidad más lenta que el flujo de la tubería. (Dick Storm PE, 2010)

a. Muestro isocinético de carbón pulverizado. El método de muestreo de carbón isocinético, aunque es el más difícil de los tres, es la mejor opción para extraer la muestra representativa de carbón de cada tubo. El muestro isocinético de carbón pulverizado es realizado con el propósito de determinar lo siguiente:

- Determinar el balance de combustible de cada tubo
- Cuantificar la relación aire-combustible de cada tubo
- Cuantificar la relación aire-combustible del pulverizador
- Cuantificar la velocidad individual de la línea de combustible y el flujo de aire
- Determinar el balance de aire de cada tubo
- Cuantificar la temperatura y presión estática de cada línea de combustible
- Obtener muestras representativas de carbón pulverizado para análisis de finesa

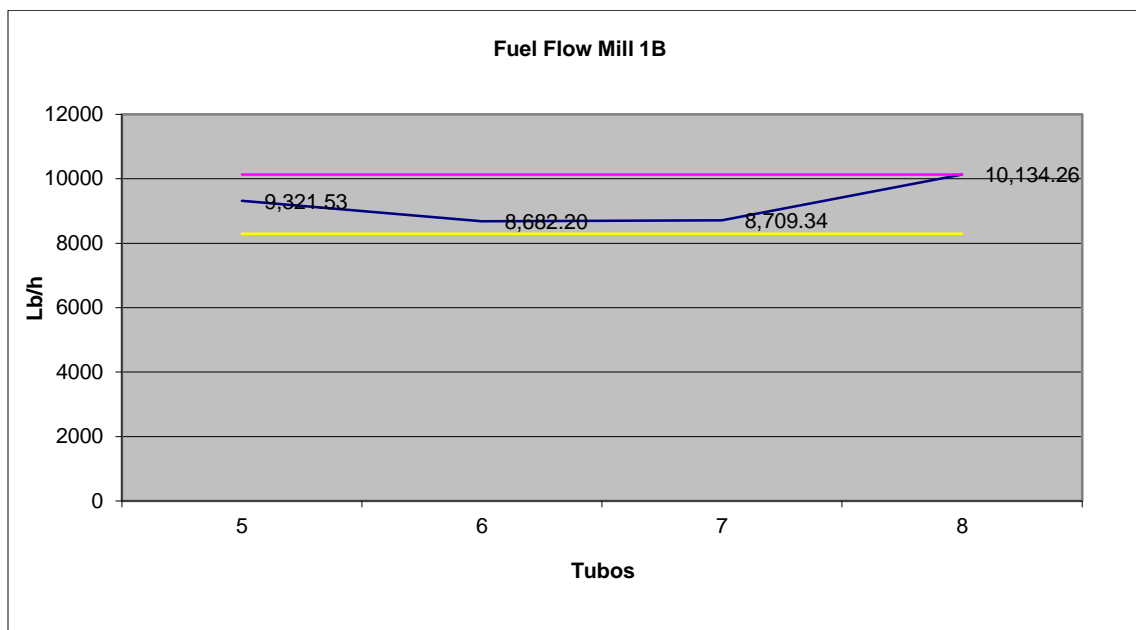
Para obtener la muestra representativa de carbón pulverizado de cada tubo es necesaria la utilización del muestreador isocinético de carbón (Ver Figura 9). El muestreo isocinético de carbón pulverizado llevado a cabo en cada tubería de carbón, al igual que la prueba de aire sucio se completa con extracciones de puntos múltiples (Usualmente 24 puntos de áreas iguales establecidos por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ASME) utilizando la sonda de muestreo (Coal Sampling Probe) en dos puertos de cada tubo durante diez segundos por cada punto, obteniendo con ello un tiempo total de muestreo de cuatro minutos. Los pesos obtenidos de cada muestra representativa se utilizan para determinar el flujo de combustible de cada tubo; los flujos de cada tubo se trazan en un gráfico para facilitar su análisis (Ver Figura 10). (Dick Storm PE, 2011)

Figura 9 Muestreador isocinético de carbón



Fuente: (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Figura 10 Gráfico de análisis de flujo de combustible



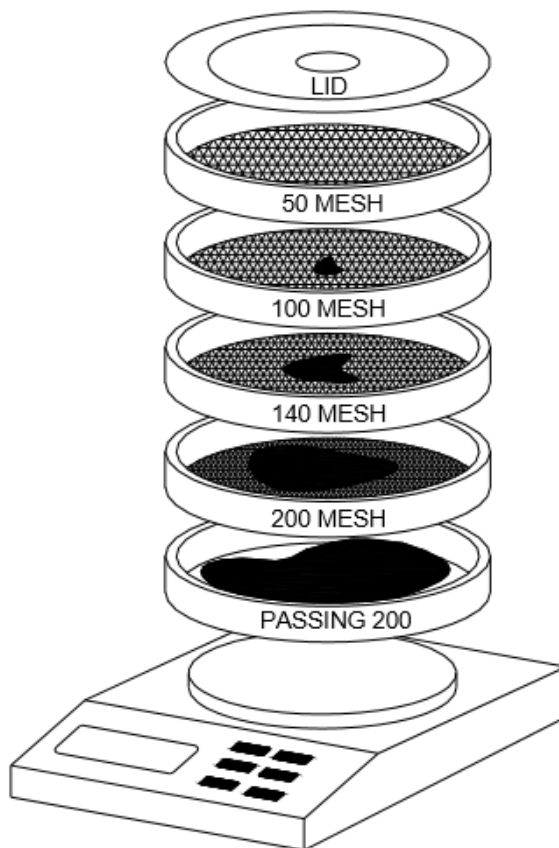
Fuente: Unidad Generadora 2016

En la Figura 10 se aprecia un ejemplo del gráfico de análisis del flujo de combustible, la línea rosa y la línea amarilla representan el $\pm 10\%$ de desviación de la tolerancia aceptable como estándar industrial del flujo de combustible, mientras que la línea azul representa los flujos de combustible que fluye en cada tubo de los molinos. Idealmente para que no existan desbalances de combustible, estos flujos deben permanecer dentro del rango establecido.

b. Finesa de carbón pulverizado. La muestra representativa además de ser utilizada para determinar el flujo de combustible de cada tubo, esta es utilizada también para determinar la finesa del carbón. El tamaño de las partículas de carbón (finesa) se determina por la cantidad de carbón que pasa por la serie de tamices estándar establecidos por la sociedad americana de pruebas y ensayos (ASTM). Los tamices utilizados son los ASTM 50, 100, 140 y 200. (Ver Figura 11). (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

La designación numérica de los tamices ASTM especifica el número de aberturas de la malla (mesh) por pulgada lineal. Por ejemplo un tamiz de malla 200 tendrá 200 aberturas por pulgada lineal. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Figura 11 Tamices ASTM



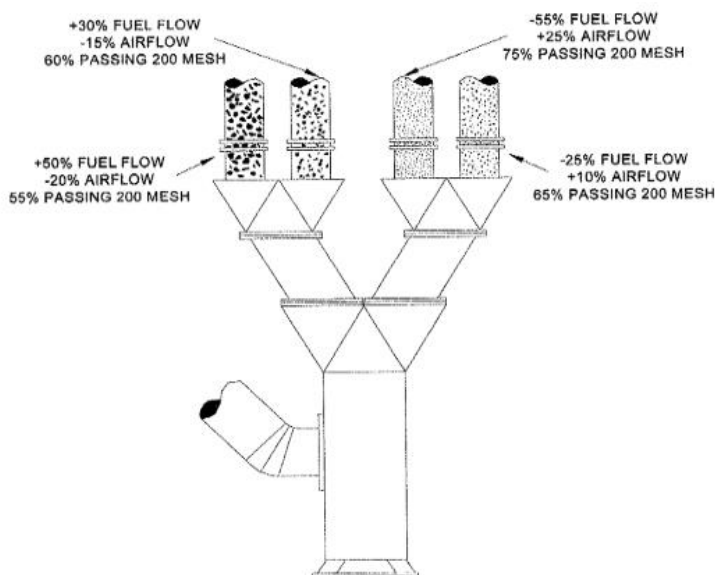
Fuente: Innovative Combustion Technologies INC 2007

Los parámetros de finesa generalmente aceptados implican que un 75% de la muestra (50 gramos de carbón pulverizado) puesta sobre la serie de tamices antes indicados, deben de pasar por el tamiz de malla 200 y el 99.5% de la muestra debe de pasar el tamiz de malla 50. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Dichos parámetros son requeridos específicamente para quemadores de bajo NO_x, por su parte la finesa del carbón no siempre es primordial para obtener emisiones aceptables de NO_x, debido a que muchos quemadores cumplen con niveles aceptables de NO_x operando con niveles pobres finesa. Sin embargo cuando se requiere de una óptima combustión y que los niveles de inquemados en la ceniza deseados sean $\leq 6\%$, es necesaria una buena finura. Los niveles de finesa que superan el 75% del tamiz 200 y el 99.9% del tamiz 50 mejora la distribución del combustible, como los niveles de inquemados en la ceniza. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007).

A medida que aumenta la finesa (reducción de las partículas de carbón), el balance de combustible mejora, mientras más fino es el carbón, la mezcla aire-carbón se comporta de una mejor manera, comportándose como un fluido. La mezcla más homogénea de aire-carbón, da como resultado una distribución más uniforme entre los tubos que van hacia los quemadores. Los pulverizadores usualmente utilizan clasificadores, los cuales emplean los principios de separación centrífuga para rechazar las partículas de carbón más gruesas de vuelta al pulverizador para el rectificando. El “re-pulverizado” impartido por la clasificación centrífuga facilita la separación de partículas de carbón más gruesas y finas. Una finesa pobre da como resultado una mezcla muy estratificada que abandona el clasificador debido a una amplia variación en el tamaño de la partícula de carbón. Las partículas masivas de carbón (finesa inferior) necesitan más fuerza cuando son arrastradas en el aire a cierta velocidad y son más fácilmente estratificadas que las partículas de carbón más finas que tienen menos masa, ejemplo ello se aprecia en la Figura 12. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

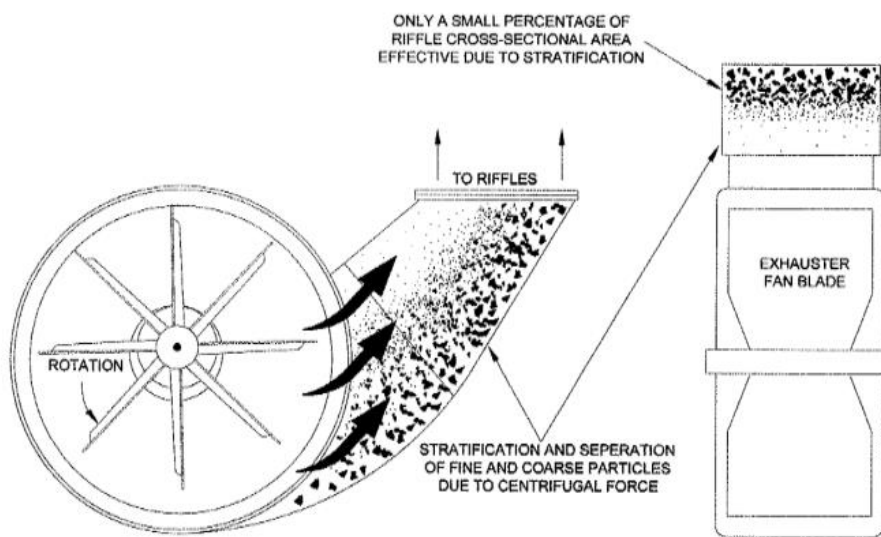
Figura 12 Balance de combustible



Fuente: (Storm Technologies, Inc., 2004)

Por su parte lograr un buen balanceo de combustible es más difícil en molinos equipados con extractores y riffles que otros tipos de pulverizadores. Debido a la fuerza centrífuga que imparte el extractor sobre las partículas de carbón, altas velocidades de aire dan como resultado una energía cinética mayor, lo cual aumenta la estratificación de las partículas de carbón cuando se imparten cambios de dirección en las mismas, lo cual se puede apreciar en la Figura 13. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Figura 13 Efecto de fuerza centrífuga sobre partículas de carbón



Fuente: (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Otro factor que incide en la finesa de las partículas de carbón pulverizado, es el alto flujo de aire primario, la optimización de este aire depende mucho del tipo de pulverizador empleado por la planta de generación, para una buena optimización de dicho aire este debe de estar en relación con el flujo de combustible, el flujo óptimo del pulverizador dependiendo su tipo en la mayoría de los casos se puede apreciar en la Figura 14. (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

Figura 14 Flujo óptimo de aire primario para pulverizadores

| <i>Pulverizer Type</i> | <i>Lbs. Air per Lb. Coal</i> |
|------------------------|------------------------------|
| MPS and EL Mills | 1.5 to 1.8 |
| Raymond Bowl Mills | 1.8 to 2.0 |
| Ball Tube Mills | 1.1 to 1.3 |
| Attrita Mills | 1.2 to 1.6 |

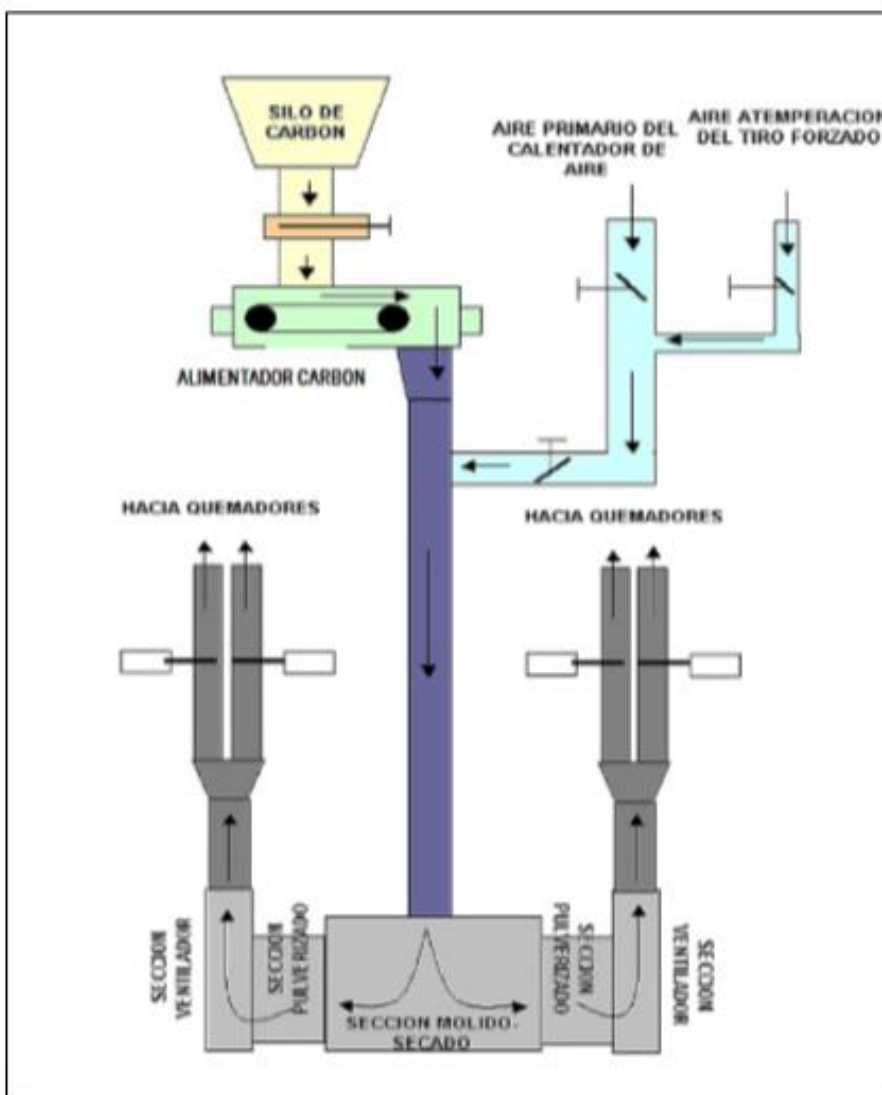
Fuente: (Innovative Combustion Technologies, Inc., 2007)

I. GENERALIDADES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA EFECTO DE ESTUDIO.

1. Descripción y ubicación de la central termoeléctrica. La central termoeléctrica objeto de estudio se utiliza como una planta de carga base con capacidad para generar 132 MW, se encuentra ubicada cerca de la localidad de Masagua a unos 75 kilómetros al sur de la ciudad de Guatemala, el proyecto consiste en una caldera acuotubular alimentada de carbón, cuenta con tres pulverizadores atrita Duplex que alimentan 12 quemadores, en tres filas de 4 quemadores cada uno, una turbina de vapor Mitsubishi de 13 etapas, un sistema de condensación de bucle cerrado que utiliza agua de refrigeración de torres de enfriamiento y un generador Brushless de tres fases. La planta opera con una eficiencia de 10.800 BTU/kWh, generando cerca de 1000 GWh al año, consumiendo alrededor de 1300 toneladas de carbón por día. (Angela Neville, JD, 2011)

2. Descripción de equipo utilizado en proceso de alimentación y pulverización de carbón. La Figura 15 ilustra el proceso de alimentación y pulverización del carbón empleado por la unidad generadora efecto de estudio, dicho proceso comprende básicamente los equipos siguientes: alimentador de carbón, sistema de aire primario y atemperación, pulverizador y tuberías de carbón pulverizado.

Figura 15 Alimentación y pulverización de carbón



Fuente: Unidad generadora 2016

3. Alimentador de carbón (Feeder). El carbón sin pulverizar, previamente conducido por una banda transportadora hacia los silos, cae directamente a un alimentador gravimétrico (Gravimetric Feeder) (Ver Figura 16) responsable de la alimentar el pulverizador a una constante tasa de regulación de carbón según lo requerido por parte de la planta. (Unidad Generadora, 2004).

Figura 16 Alimentador gravimétrico



Fuente: (Unidad Generadora, 2004)

Este alimentador cuenta con un rodillo magnético en la descarga de carbón, su función es retener pedazos de metal que en circunstancias no deseadas se pudieran encontrar en el carbón, lo que causaría daños en partes del pulverizador. Asimismo, en la descarga de carbón del alimentador se encuentra localizado un damper (Ver Figura 17), cuyo objetivo es balancear el flujo de carbón entre las dos secciones del pulverizador. (Unidad Generadora, 2004)

Figura 17 Damper



Fuente: Unidad Generadora 2016

4. Sistema de aire primario y atemperación. El carbón proveniente de los alimentadores es mezclado antes de entrar a la sección de molido-secado con aire primario y de atemperación, el aire primario es una mezcla de aire caliente proveniente de la salida del calentador de aire y el aire de atemperación proviene directamente del ventilador de tiro forzado. El flujo de aire primario es controlado por medio de la relación aire combustible según una curva ya establecida en el sistema de la unidad generadora, mientras que el flujo de aire de atemperación es controlado automáticamente mediante un set de temperatura en el pulverizador de 190 °F, para evitar riesgo de fuego en el pulverizador. (Unidad Generadora, 2004)

En la Figura 18 se puede apreciar la entrada de aire primario y atemperación hacia el pulverizador, con lo que se consigue disminuir la humedad del carbón.

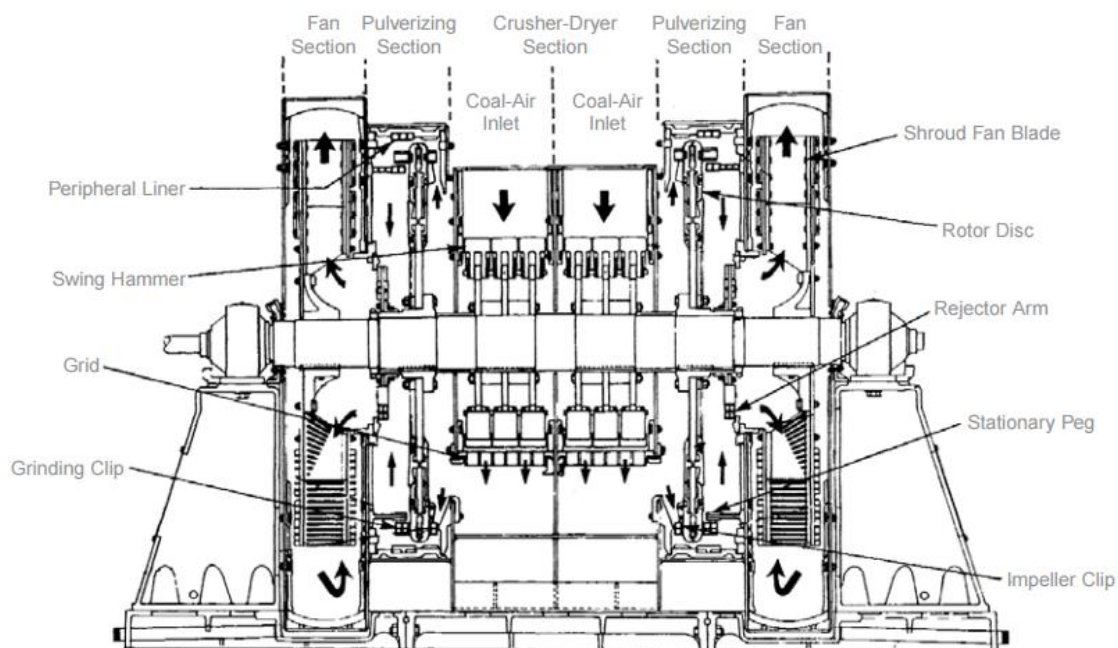
Figura 18 Sistema de aire primario y atemperación



Fuente: (Unidad Generadora, 2004)

5. Pulverizador. La planta cuenta con tres pulverizadores Atrita 558D Duplex (Ver Figura 19). El pulverizador atrita es un pulverizador horizontal de alta velocidad, el cual consta de tres secciones principales que son: sección de molido y secado, sección de pulverizado y sección de ventilador.

Figura 19 Pulverizador Atrita 558D Duplex



Fuente: (Riley Power Inc, 2004)

El carbón alimentado al pulverizador es primero reducido de tamaño en la sección de molido y secado a través de unos martillos y una placa de corte, debajo de la placa de corte se encuentra la sección de trituración (Crusher Block), la cual se puede ajustar para avanzar o retroceder en contra los martillos y de esta forma establecer un espacio entre las puntas de los martillos para obtener una mejor molienda del carbón, las rejillas situadas bajo los martillos junto al espacio entre las puntas de los martillos, controlan el tamaño (finesa) de las partículas de carbón. El ajuste de la sección de trituración (Crusher Block) se lleva a cabo mediante el ajuste de 4 tornillos (Ver Figura 20), dicho ajuste consiste en introducir los cuatro tornillos hasta escuchar un sonido que evidencie que los martillos estén haciendo contacto entre si y luego retroceder $\frac{3}{4}$ de pulgada cada tornillo. (Riley Power Inc, 2004)

Figura 20 Sección de trituración



Fuente: Unidad Generadora 2016

En la sección de pulverizado, sus principales componentes son unos pasadores estacionarios y clips móviles. Los clips móviles están unidos a una rueda que gira alrededor del eje del molino a una alta velocidad. El flujo turbulento y el momento de impacto sobre las partículas de carbón desarrolladas por el movimiento a alta velocidad de los clips crean un desgaste intenso de partícula a partícula, creando un efecto de pulverización adicional para triturar las partículas de carbón. Con el fin de obtener una mejor finesa del carbón pulverizado, el pulverizador cuenta con un clasificador tipo whizzer o bien un brazo de rechazo (V-Shaped Rejector) entre la sección de molido y la sección de ventilador, los brazos de rechazo que giran junto al rotor del pulverizador, aumentan la intensidad de la fuerza centrífuga dentro de la sección de molido, con lo que se consigue retener las partículas de carbón más gruesas para una pulverización adicional. (Riley Power Inc, 2004)

Actualmente los pulverizadores utilizados en la unidad generadora cuentan con un nuevo diseño de brazo rechazador, denominado como DynaRing, el cual crea un efecto dinámico de sello adicional. A través de este nuevo diseño de brazo rechazador se consigue obtener una mejor reducción de las partículas de carbón, por tanto se obtiene una mejor finesa del carbón. (Riley Power Inc, 2004)

Las partículas de carbón más finas, sometidas a fuerzas menos centrifugas, debido a masas más reducidas en áreas seccionales del pulverizador, pasan a través de los brazos de rechazo junto con el aire primario hacia la sección de ventilador y son finalmente suministradas a los quemadores de la caldera a través de los tubos de carbón. (Riley Power Inc, 2004)

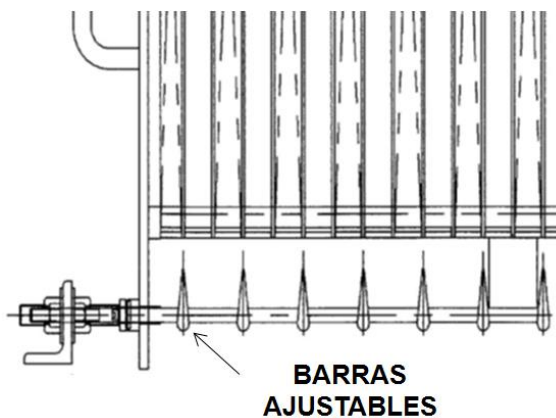
A la salida de cada pulverizador se sitúa un distribuidor (Riffle). El Riffle (Ver Figura 21) es una estructura metálica de forma triangular, compuesta por una serie de placas verticales fijas espaciadas entre sí y una serie de barras horizontales ajustables, en forma de gota (Ver Figura 22) situadas en la parte inferior del mismo. Cada pulverizador cuenta con dos riffles, ubicados al norte y al sur respectivamente del mismo, obteniendo un total de cuatro tubos carbón por pulverizador.

Figura 21 Riffle



Fuente: Elaboración propia

Figura 22 Mecanismo de ajuste

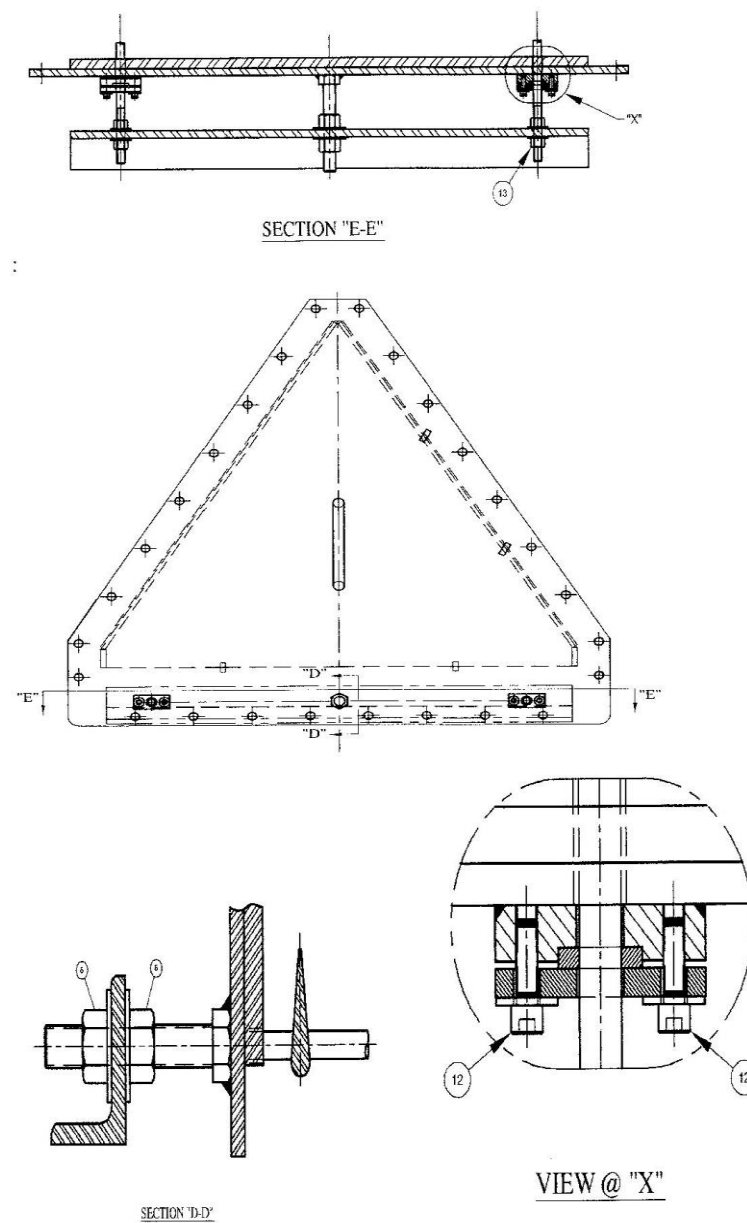


Fuente: Unidad Generadora 2016

Las barras horizontales ajustables del riffle se mueven y fijan a través de un mecanismo de tornillos (Ver Figura 23). Cuya función es obstruir el paso de la mezcla aire-carbón en uno de los lados del Riffle (Ver Figura 24 y 25) consiguiendo de esta manera repartir dicha mezcla en cantidades iguales entre los dos tubos independientes de carbón salientes del pulverizador.

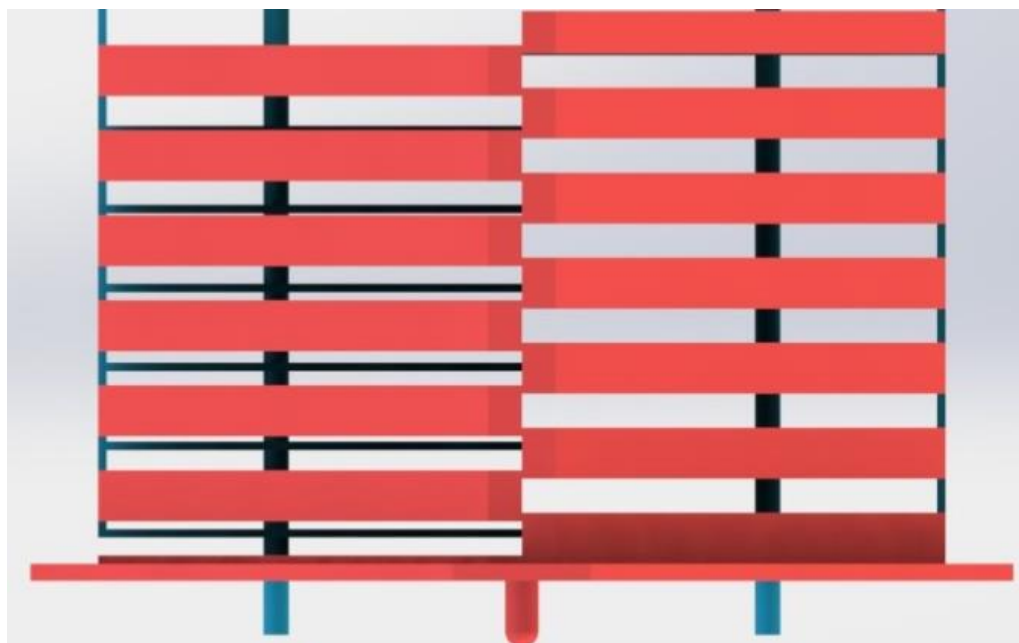
Figura 23 Mecanismo de ajuste de barras ajustables

6.0 ADJUSTMENT MECHANISM



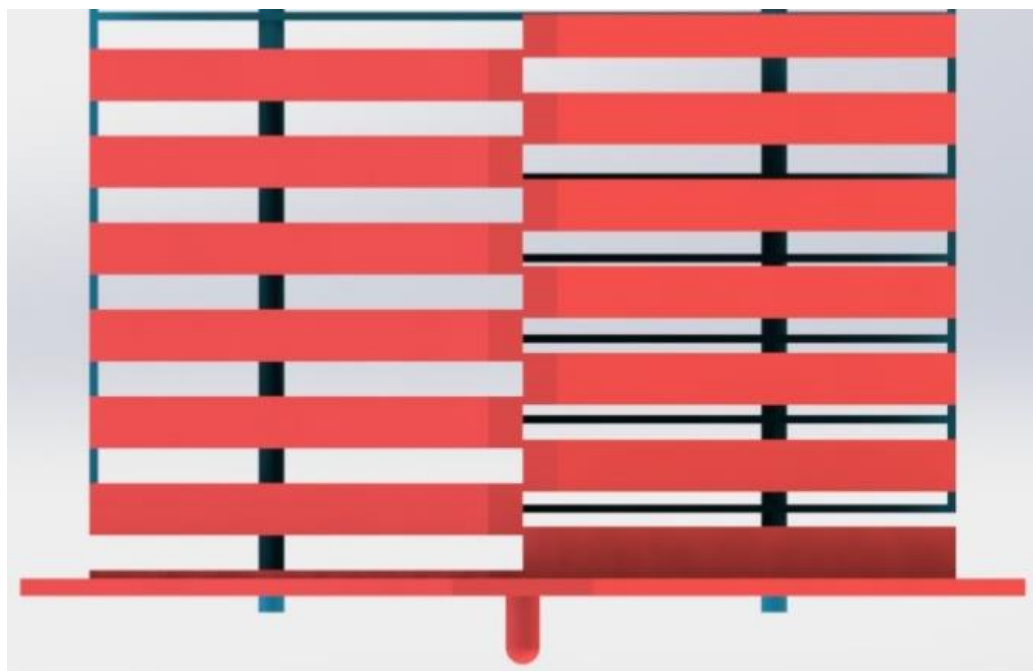
Fuente: Unidad Generadora 2016

Figura 24 Vista superior del Riffle obstruyendo lado norte



Fuente: Elaboración propia 2016

Figura 25 Vista Superior del Riffle obstruyendo lado norte



Fuente: Elaboración propia 2016

V. METODOLOGÍA

A. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.

El método utilizado en el presente trabajo de investigación, basó su análisis en un enfoque cuantitativo, bajo un alcance descriptivo de tipo experimental. La recopilación de datos se llevó a cabo mediante la participación de muestreos de carbón realizados en la unidad generadora efecto de estudio, realizando los análisis correspondientes junto al ingeniero de operaciones para la interpretación y corrección de los mismos.

B. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE DESBALANCES DE AIRE Y CARBÓN.

Los procedimientos utilizados para identificar los parámetros requeridos en la determinación de los desbalances de la mezcla aire-carbón, se realizó de la siguiente forma:

1. **Muestreo de carbón.** Los muestreos de carbón pulverizado son realizados de forma periódica una vez por mes, por el operador auxiliar asignado, específicamente en los cuatro tubos salientes de cada pulverizador en el tercer nivel de caldera donde se ubican los puertos de muestreo, para ello la metodología utilizada fue la establecida por la norma ASTM D 1997-87 denominada como método de muestreo y finesa de carbón pulverizado, el cual consiste en los procedimientos descritos a continuación. El procedimiento establecido por la norma ASTM D 1997-87 se describe en el anexo 1.

a. **Procedimiento de aire de mezcla.** Para llevar a cabo el procedimiento de aire de mezcla se realizaron la prueba temperatura y presión estática y la prueba de aire sucio (Dirty Air Test).

1) **Prueba de temperatura y presión estática.** En esta prueba se determinó la temperatura y presión estática de cada tubo del pulverizador, a través de la utilización de la sonda y equipo empleado por la norma antes indicada. Los parámetros obtenidos fueron recopilados a través del formulario PG.04.COAL-LAB.02.O1 empleado por la unidad generadora para los muestreos de carbón. El modelo del formulario PG.04.COAL-LAB.02.O1 se encuentra en el anexo 5.

2) Prueba de aire sucio (Dirty Air Test). En esta prueba se utilizó la sonda de aire sucio (Dirty Air Probe) y equipo establecido por la norma ASTM, a través de dicho dispositivo se determinó la presión requerida por la prueba en los distintos puntos del tubo del pulverizador. Los parámetros obtenidos durante la prueba fueron recopilados en el formulario REG.04.COAL-LAB.02.01.

b. Procedimiento de muestreo de carbón pulverizado método isocinético. A través de los parámetros obtenidos durante las dos pruebas anteriores, se determinó el diferencial de presión de cada tubo el diferencial de presión obtenido de cada tubo, se utilizó para aproximar la velocidad de recolección de la muestra a través de la punta de la sonda de muestreo de carbón con la velocidad del aire del tubo a muestrear.

En esta prueba se obtuvo una muestra representativa de carbón de cada tubo para ello se utilizó la sonda de muestreo de carbón pulverizado (Isokinetic Coal Sampler) y equipo requerido aplicando el procedimiento establecido por la norma ASTM D 1997-87, la muestra de carbón obtenida se almaceno y traslado al laboratorio químico donde se pesó y guardo para el análisis de fineza. El peso obtenido de cada muestra representativa, se registró en el formulario REG.04.COAL-LAB.02.01.

2. Procedimiento de fineza de carbón pulverizado. La fineza del carbón pulverizado se analizó en el laboratorio químico de la unidad generadora, aplicando el procedimiento de mesh de carbón pulverizado establecido por la norma ASTM D 1997-87, los datos obtenidos durante el procedimiento fueron recopilados en la hoja de resultados empleada por la unidad generadora para el análisis de fineza del carbón. Tanto el procedimiento de mesh de carbón pulverizado como el modelo de la hoja de resultados se encuentran en los anexos 2 y 6 respectivamente.

C. DETERMINACIÓN DE EFECTOS.

La determinación de inquemados y Nox se realizó de la siguiente forma:

1. Inquemados. El porcentaje de inquemados denominado L.O.I por sus siglas en inglés (Loss of Ignition) se obtuvo aplicando la metodología establecida por la norma ASTM D 3174-97 denominada como método para obtener la ceniza en la muestra de análisis de carbón. Los datos obtenidos a través de este procedimiento fueron analizados a través de una fórmula establecida por la cual se determinó el porcentaje de L.O.I de la caldera. El procedimiento establecido por la norma ASTM D 3174-97 se encuentra descrito en el anexo 3.

2. NOx. Los valores de NOx emitidos por la caldera, fueron determinados a través de una maleta analizadora de gases, en el séptimo nivel de caldera donde se ubican los puertos de muestreo.

D. PARÁMETROS DE CONTROL DE OPERACIÓN.

Los parámetros de control de operación utilizados por la unidad generadora objeto de estudio son los siguientes:

- Balance de $\pm 5\%$ de desviación en el flujo de aire sucio entre cada línea separada del pulverizador.
- Balance de $\pm 10\%$ de desviación en el flujo de combustible entre cada línea separada del pulverizador.
- Finesa, el 75% de la muestra debe de superar el tamiz (Mesh) 200, y 99.5% el tamiz 50.
- Valores de inquemados $\leq 6\%$
- Emisiones de Nox ≤ 270 gr/MMBTU

E. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

Los parámetros recopilados a través de los procedimientos anteriores, fueron trasladados a una hoja de cálculo de Excel, provista de una serie de fórmulas utilizadas para realizar los cálculos con los cuales se determinaron e interpretaron los desbalances de aire y carbón de la unidad generadora, así como en sus efectos. A continuación se muestran las fórmulas empleadas en la hoja de cálculo de Excel antes indicada.

1. Cálculos de muestreo de carbón.

Abreviaturas:

Avg = Promedio

BP = Presión barométrica

SP = Presión estática

Vh = Velocidad de cabeza

K = Factor "K" de la sonda

Área = Área de la tubería

Q = Caudal volumétrico

Presion Atmosférica = 0.075 lbs/pies²

FDA = Flujo de aire

FDC = Flujo de combustible

$$1. \text{ Avg}\sqrt{Vh} = \frac{\sum_{h=1}^n \sqrt{Vh}}{n}$$

$$2. \text{ Densidad } (\delta) = \frac{460+70^{\circ}\text{F}}{460+^{\circ}\text{F}} * \frac{BP+SP}{29.99^{\circ}\text{Hg}} * 0.075 \text{ lbs/pies}^3$$

$$3. \text{ Velocidad} = 1096 * \frac{\text{Avg}\sqrt{Vh}}{\sqrt{\delta}} * K$$

$$4. \text{ Caudal Volumétrico}(Q) = \text{Velocidad} * \text{area tansversal de la tubería (pies}^2)$$

$$5. \text{ Flujo másico (Flujo de aire)} = \text{Caudal Volumétrico } (Q) * 60 \text{ min/hr} * \text{Desidad(lbs/pies}^3)$$

$$6. \text{ Flujo de combustible} = \frac{\text{Muestra Representativa (gr)}}{453.6 \text{ gr/lb}} * \frac{60 \text{ min/hr}}{4 \text{ min}} * \frac{\text{area del tubo (pies}^2)}{0.0021 \text{ pies}^2}$$

$$7. \text{ Diferencial de presión } (\Delta P) = 1573(\text{Avg}\sqrt{Vh})^2 (K)^2$$

$$8. \text{ Flujo de aire total} = \sum_{FDA=1}^n FDA$$

$$9. \text{ Flujo de combustible total} = \sum_{FDC=1}^n FDC$$

$$10. \text{ Avg flujo de aire} = \frac{\text{Flujo total de aire}}{4}$$

$$11. \text{ Avg flujo de combustible} = \frac{\text{Flujo total de combustible}}{4}$$

$$12. \text{ Desviación del flujo de aire por tubo} = \frac{\text{Flujo de aire} - \text{Avg Flujo de aire}}{\text{Avg Flujo de aire}} * 100$$

$$13. \text{Desviación del flujo de aire por lado} = \frac{\text{Flujo de aire tubo 1} + \text{Flujo de aire tubo 2}}{\text{Flujo de aire total}}$$

$$14. \text{Desviación por lado del flujo de aire del pulverizador} = \text{Desviación de aire lado sur} - \text{Desviación de aire lado norte}$$

$$15. \text{Desviación del flujo de combustible por tubo} = \frac{\text{Flujo de combustible} - \text{Avg Flujo de combustible}}{\text{Avg Flujo de combustible}} * 100$$

$$16. \text{Desviación del flujo de combustible por lado} = \frac{\text{Flujo de combustible tubo 1} + \text{Flujo de combustible tubo 2}}{\text{Flujo de combustible total}}$$

$$17. \text{Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador} = \text{Desviación de combustible lado sur} - \text{Desviación de combustible lado norte}$$

2. Cálculos de inquemados L.O.I.

Abreviaturas:

W_{CSD} = Crisol con muestra seca

W_{CSFW} = Crisol con muestra final

W_C = Peso del crisol

$$18. L.O.I = \left[\frac{(W_{CSD} - W_C) - (W_{CSFW} - W_C)}{(W_{CSD} - W_C)} \right] * 100$$

De los cálculos obtenidos a través de estas fórmulas para la determinación y corrección de desbalances se analizaron principalmente las desviaciones por tubo del flujo de aire y del flujo combustible de los tres pulverizadores, a través de la interpretación de las dos gráficas generadas por la hoja de cálculo del comportamiento de los flujos de aire y combustible dentro de los parámetros de control de operación aceptables, siendo el flujo de combustible el determinante para la unidad generadora objeto de estudio el utilizado para el balanceo de los tubos. Adicionalmente debido a que los tres pulverizadores utilizados en la unidad son Duplex se analizaron las desviaciones por lado de cada pulverizador, idealmente para que ambos lados del pulverizador tengan la misma cantidad de combustible esta desviación debe de ser lo más próxima a cero posible. Por lo que se realizaron los ajustes necesarios tanto en Dampers o Riffles y se comprobó que las desviaciones estuvieran dentro de los parámetros de control de operación aceptables. Por su parte los parámetros de inquemados y Nox obtenidos de los cálculos realizados se analizaron al inicio y al final del balanceo de los tubos.

F. ELABORACIÓN DE GUÍA BÁSICA DE OPERACIÓN PARA CORRECCIÓN DE DESBALANCES

La metodología utilizada en la elaboración de la guía básica de operación para la corrección de desbalances de aire y carbón, se basó en un enfoque descriptivo, para la recopilación de información se observó en cada etapa de los procedimientos las tareas realizadas por el ingeniero de operaciones y operadores identificando su proceso lógico y secuencial.

Las etapas lógicas que se llevaron a cabo para realizar la guía fueron las siguientes:

- Recopilación de información a través de observación y cuestionamientos de los procedimientos a los operadores encargados de los muestreos.
- Realización de cuestionamientos directos al ingeniero de operaciones de la unidad generadora.
- Recopilación de información de parámetros de control a analizar.
- Realización de correcciones mecánicas en equipos de Damper y Riffle de la unidad generadora.

La información recopilada en cada etapa, fue tabulada y estructurada siguiendo el formato utilizado por la unidad generadora (Ver anexo 1, 2 y 3), elaborando un diagrama de proceso de operaciones de cada tarea realizada en la corrección de los desbalances de aire y carbón. La guía básica de operación se encuentra en el anexo 4.

VI. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los muestreos realizados en los tres pulverizadores de la unidad en las fechas 27, 28 y 29 de junio del 2016. El carbón utilizado en dichas fechas fue un carbón 100% CMC clasificado como una hulla bituminosa térmica con un poder calorífico de 11362 BTU/Lb. El certificado de muestreo y análisis del carbón se encuentra en el anexo 7.

A. RESULTADOS DE MUESTREO INICIAL

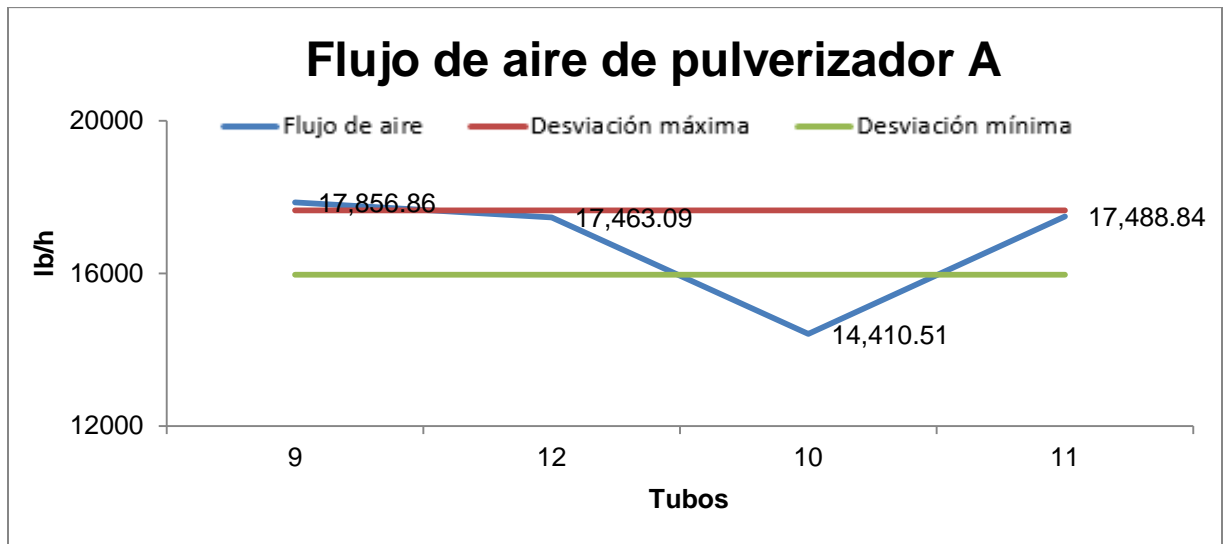
1. Pulverizador A. Los resultados obtenidos del muestreo inicial realizado en pulverizador A son los siguientes:

Tabla 2 Desviación de flujo de aire inicial de pulverizador A

| Desviación por lado del flujo de aire del pulverizador | | | 5.09% |
|--|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de Aire (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 5 %) | Desv/Lado |
| 9 | 17856.85823 | 6.260309458 | 52.54% |
| 12 | 17463.08969 | 3.917121946 | |
| 10 | 14410.51115 | -14.24777226 | 47.46% |
| 11 | 17488.83786 | 4.070340855 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 26 Flujo de aire inicial de pulverizador A



Fuente: Unidad generadora 2016

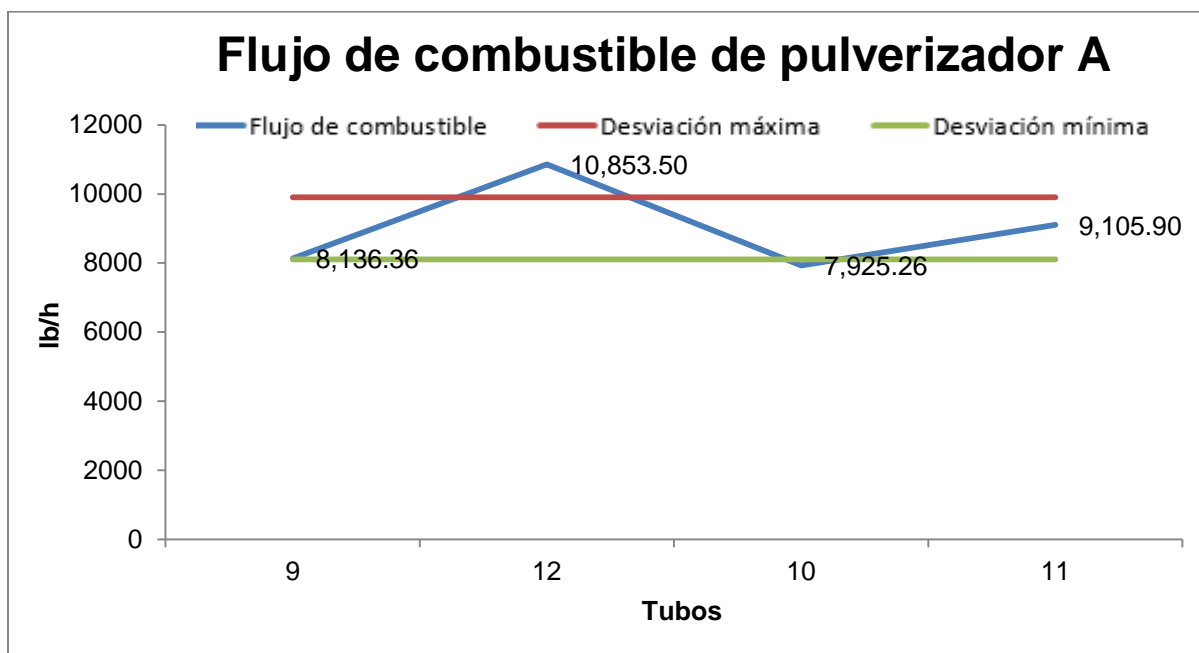
En la Tabla 2 se muestra la desviación por lado del flujo de aire del pulverizador, los flujos de aire y las desviaciones del flujo de aire de cada tubo obtenidas del pulverizador A, observando que las desviaciones del flujo de aire del tubo 9 y 10 superan el parámetro de control del $\pm 5\%$ de operación aceptable como estándar industrial. Asimismo se observa una desviación por lado del flujo de aire en el pulverizador de 5.09%. En la Figura 26 se aprecia el gráfico de análisis de los flujos de aire, observando que el flujo de aire del tubo 9 supera levemente la línea límite de desviación máxima aceptable y el flujo de aire del tubo 10 supera de manera significativa la línea límite de la desviación mínima aceptable en el pulverizador, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede establecer que existe un desbalance del flujo de aire en el pulverizador.

Tabla 3 Desviación de flujo de combustible inicial de pulverizador A

| Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador | | | 5.44% |
|---|-----------------------------|---------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de combustible (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 10%) | Desv/Lado |
| 9 | 8136.357206 | -9.648792331 | 52.72% |
| 12 | 10853.50244 | 20.52409059 | |
| 10 | 7925.258243 | -11.99296747 | 47.28% |
| 11 | 9105.90459 | 1.11766922 | |

Fuente: Unidad Generadora 2016

Figura 27 Flujo de combustible inicial de pulverizador A



Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 3 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador, los flujos de combustible y las desviaciones del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador A, observando que las desviaciones del flujo de combustible del tubo 10 y 12 superan el parámetro de control del $\pm 10\%$ de operación aceptable. Asimismo se observa una desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador de 5.44%. En la Figura 27 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible, observando que el flujo de combustible del tubo 12 supera de manera significativa la línea límite de desviación máxima aceptable y el flujo de combustible del tubo 10 supera muy levemente la línea límite de desviación mínima aceptable en el pulverizador, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede establecer que existe un desbalance del flujo de combustible en el pulverizador.

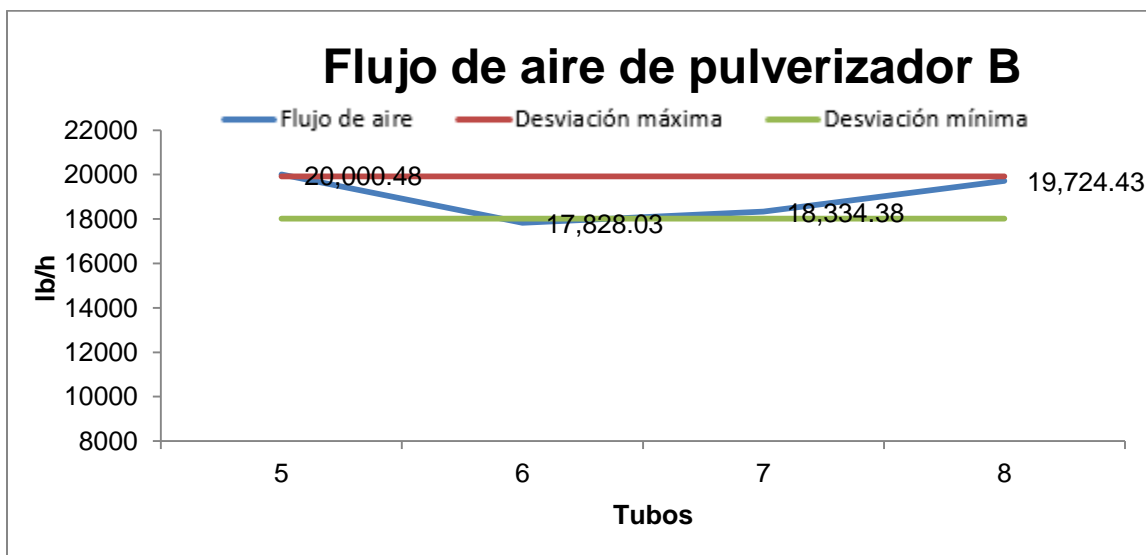
2. Pulverizador B. Los resultados obtenidos del muestreo inicial realizado en pulverizador B son los siguientes:

Tabla 4 Desviación de flujo de aire inicial de pulverizador B

| Desviación por lado del flujo de aire del pulverizador | | | 0.30% |
|--|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de aire (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 5 %) | Desv/Lado |
| 5 | 20000.47502 | 5.421971293 | 49.85% |
| 6 | 17828.02819 | -6.028938132 | |
| 7 | 18334.38196 | -3.359960861 | 50.15% |
| 8 | 19724.42666 | 3.9669277 | |

Fuente: Unidad generadora

Figura 28 Flujo de aire inicial de pulverizador B



Fuente: Unidad generadora 2016

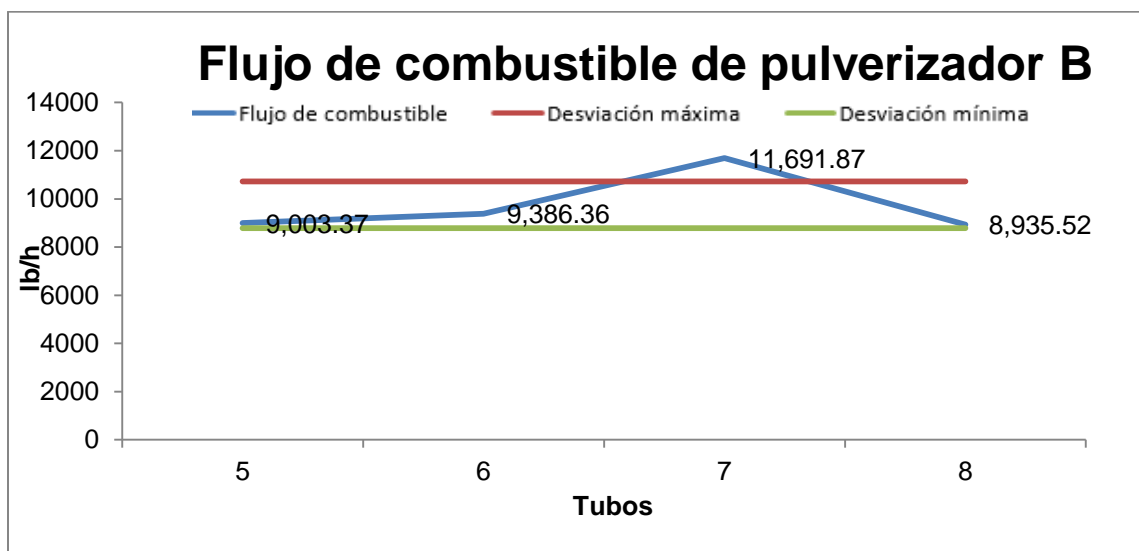
En la Tabla 4 se muestra la desviación por lado del flujo de aire del pulverizador, los flujos de aire y las desviaciones del flujo de aire de cada tubo obtenidas del pulverizador B, observando que únicamente la desviación del flujo de aire del tubo 6 supera el parámetro de control del $\pm 5\%$ de operación aceptable. Asimismo se observa una desviación por lado del flujo de aire en el pulverizador de 0.30%. En la Figura 28 se aprecia el gráfico de análisis de los flujos de aire, observando que solamente el flujo de aire del tubo 6 supera muy levemente la línea límite de la desviación mínima aceptable en el pulverizador, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede considerar como balanceado el flujo de aire en el pulverizador.

Tabla 5 Desviación de flujo de combustible inicial de pulverizador B

| Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador | | | 5.74% |
|---|-----------------------------|---------------------------------|--------|
| Pipe No. | Flujo de combustible (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 10%) | |
| 5 | 9003.370808 | -7.698253208 | 47.13% |
| 6 | 9386.364642 | -3.771834905 | |
| 7 | 11691.8669 | 19.86396661 | 52.87% |
| 8 | 8935.51757 | -8.393878497 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 29 Flujo de combustible inicial de pulverizador B



Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 5 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador, los flujos de combustible y las desviaciones del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador B, observando que únicamente la desviación del flujo de combustible del tubo 7 supera el parámetro de control del $\pm 10\%$ de operación aceptable. Asimismo se observa una desviación por lado del flujo de aire en el pulverizador de 5.74%. Sin embargo, a pesar de que se consideró como balanceado el flujo de aire en el pulverizador, en el gráfico de análisis del flujo de combustible de la Figura 29 se observa que el flujo de combustible del tubo 7 supera de manera significativa la línea límite de desviación máxima aceptada, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede determinar que el tener un flujo de aire balanceado no garantiza obtener un flujo de combustible balanceado.

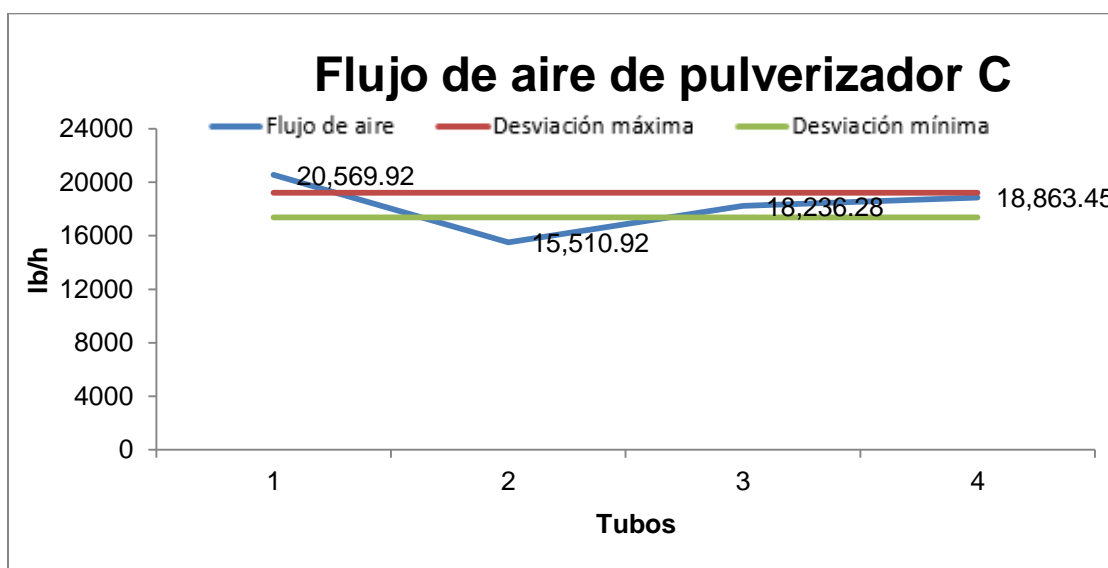
3. Pulverizador C. Los resultados obtenidos del muestreo inicial realizado en pulverizador C son los siguientes:

Tabla 6 Desviación de flujo de aire inicial de pulverizador C

| Desviación por lado del flujo de aire del pulverizador | | | 1.39% |
|--|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de aire (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 5 %) | Desv/Lado |
| 1 | 20569.91988 | 12.43378075 | 49.30% |
| 2 | 15510.92398 | -15.21834622 | |
| 3 | 18236.27864 | -0.321743328 | 50.70% |
| 4 | 18863.44564 | 3.1063088 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 30 Flujo de aire inicial de pulverizador C



Fuente: Unidad generadora 2016

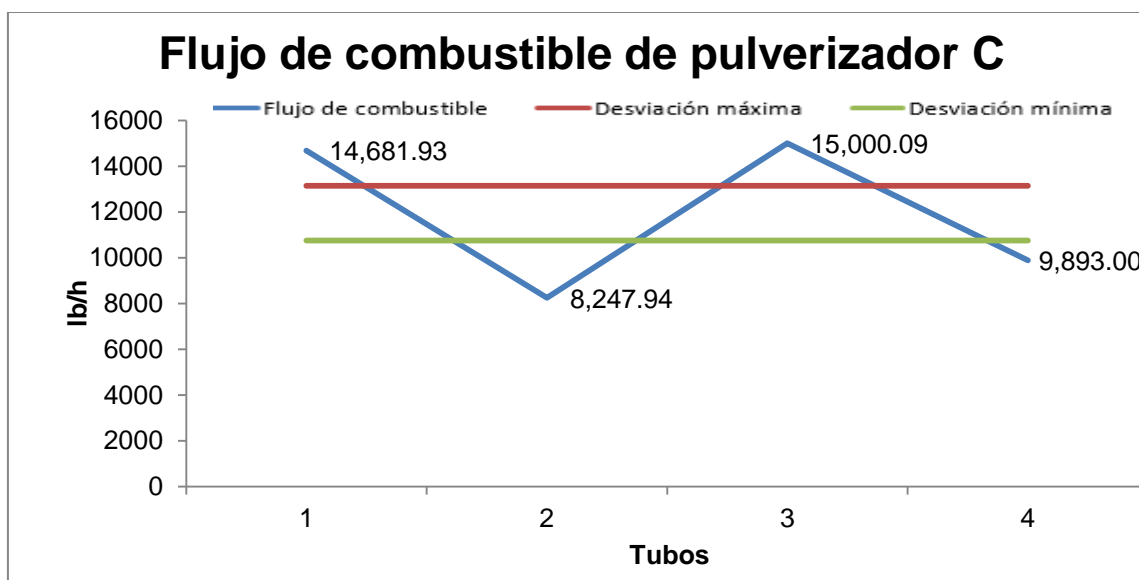
En la Tabla 6 se muestra la desviación por lado del flujo de aire del pulverizador, los flujos de aire y las desviaciones del flujo de aire de cada tubo obtenidas del pulverizador C, observando que las desviaciones del flujo de aire del tubo 1 y 2 superan el parámetro de control del $\pm 5\%$ de operación aceptable. Asimismo se observa una desviación por lado de los flujos de aire del pulverizador de 1.39%. En la Figura 30 se aprecia el gráfico de análisis de los flujos de aire, observando que tanto el flujo de aire del tubo 1 y 2 superan de manera significativa las líneas límites de la desviación máxima y mínima aceptadas, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede establecer que existe un desbalance del flujo de aire en el pulverizador.

Tabla 7 Desviación de flujo de combustible inicial de pulverizador C

| Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador | | | 4.11% |
|---|-----------------------------|---------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de combustible (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 10%) | Desv/Lado |
| 1 | 14681.93294 | 22.80237104 | 47.95% |
| 2 | 8247.938087 | -31.01273805 | |
| 3 | 15000.08923 | 25.46348846 | 52.05% |
| 4 | 9893.002156 | -17.25312145 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 31 Flujo de combustible inicial de pulverizador C



Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 7 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador, los flujos de combustible y las desviaciones del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador C, observando que todas las desviaciones del flujo de combustible de cada tubo superan el parámetro de control del $\pm 10\%$ de operación aceptables. Asimismo se observa una desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador de 4.11%. En la Figura 31 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible observando que los flujos de combustible de los cuatro tubos superan de manera significativa tanto la línea límite de desviación máxima como la línea límite de desviación mínima aceptadas, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede establecer que existe un desbalance del flujo de combustible en el pulverizador.

4. Inquemados (L.O.I) y Nox. Los resultados obtenidos de inquemados (L.O.I) y Nox en el muestreo inicial son los siguientes:

Tabla 8 Resultados de inquemados (L.O.I) y Nox iniciales

| Fecha | No. Crisol | Punto de muestreo | Peso muestra 6to Y 7mo. Nivel (gramos) | Inquemados (L.O.I) | | | | | | Nox Convertido (gr/MMBTU) |
|------------|------------|-------------------|--|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------|---------|----------|---------------------------|
| | | | | Peso crisol vacío Wc (g) | Peso crisol con muestra Wcsd (g) | Peso crisol final Wcsfw (g) | Ceniza (%) | LOI (%) | PROMEDIO | |
| 27/06/2016 | 1 | 6 NIVEL ESTE | 149.3 | 17.9985 | 18.4985 | 18.4305 | 86.40 | 13.60 | 9.98 | 214.70 |
| | 2 | | | 17.8691 | 18.3691 | 18.3118 | 88.54 | 11.46 | | |
| | 3 | 6 NIVEL OESTE | 206.1 | 17.6806 | 18.1806 | 18.0949 | 82.86 | 17.14 | | |
| | 4 | | | 17.2647 | 17.7647 | 17.6758 | 82.22 | 17.78 | | |
| | 5 | 7 NIVEL ESTE | 218.5 | 18.5045 | 19.0045 | 18.9889 | 96.88 | 3.12 | | |
| | 6 | | | 16.0021 | 16.5021 | 16.4622 | 92.02 | 7.98 | | |
| | 7 | 7 NIVEL OESTE | 77.1 | 18.5797 | 19.0797 | 19.0558 | 95.22 | 4.78 | | |
| | 8 | | | 16.4128 | 16.9128 | 16.8930 | 96.04 | 3.96 | | |

Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 8 se muestran los porcentajes de L.O.I y la lectura de Nox obtenidos en la fecha inicial de los muestreos realizados en la unidad generadora, observando que el promedio del porcentaje de L.O.I es de 9.98 el cual supera el parámetro de control del $\leq 6\%$ de operación aceptable y la lectura de Nox convertido es de 214.70 gr/MMBTU el cual cumple con el parámetro de control de operación de emisiones aceptables.

5. Finesa de carbón pulverizado. Los resultados de finesa del carbón pulverizado obtenidos de los tres pulverizadores de la unidad son los siguientes:

Tabla 9 Resultados de finesa del pulverizador A

| | PULVERIZADOR A | | | | % A Superar |
|----------|----------------|---------|---------|---------|-------------|
| | Tubo 9 | Tubo 12 | Tubo 11 | Tubo 10 | |
| MESH 50 | 99.6 | 99.2 | 99.2 | 99.6 | 99.5% |
| MESH 200 | 91.2 | 75 | 87.6 | 76.4 | 75% |

Fuente: Unidad generadora 2016

Tabla 10 Resultados de finesa del pulverizador B

| | PULVERIZADOR B | | | | % A Superar |
|----------|----------------|--------|--------|--------|-------------|
| | Tubo 5 | Tubo 6 | Tubo 7 | Tubo 8 | |
| MESH 50 | 99.6 | 99.6 | 100 | 99.6 | 99.5% |
| MESH 200 | 89.2 | 76.8 | 85.2 | 74 | 75% |

Fuente: Unidad generadora 2016

Tabla 11 Resultados de finesa del pulverizador C

| | PULVERIZADOR C | | | | % A Superar |
|----------|----------------|--------|--------|--------|-------------|
| | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | |
| MESH 50 | 99.6 | 98.8 | 99.6 | 99.6 | 99.5% |
| MESH 200 | 83.6 | 64 | 85.4 | 72.6 | 75% |

Fuente: Unidad generadora 2016

En las Tablas 9, 10 y 11 se muestran los resultados evaluados en la prueba, observando que únicamente los tubos 11 y 12 no superaron el 99.5% de los parámetros de finesa aceptables por el tamiz de malla 50, mientras que los tubos 2, 4 y 8 no superaron el 75% de los parámetros de finesa aceptables por el tamiz de malla 200, a pesar de que los tubos antes mencionados no superaron los parámetros establecidos, la unidad no considero necesario hacer ningún tipo de ajuste a los pulverizadores, con el objetivo de mejorar la finesa.

B. RESULTADOS DE MUESTREO FINAL

De los resultados observados en los muestreos iniciales, al ser el flujo de combustible el determinante para balancear los tubos en la unidad generadora objeto de estudio, se establecieron desbalances del flujo de combustible en los tres pulverizadores, por lo que se realizaron las correcciones necesarias en equipos de Damper y Riffles de cada pulverizador con el objetivo de balancear estos flujos de la mejor manera posible. A continuación se presentan los resultados obtenidos de los muestreos finales realizados en cada pulverizador.

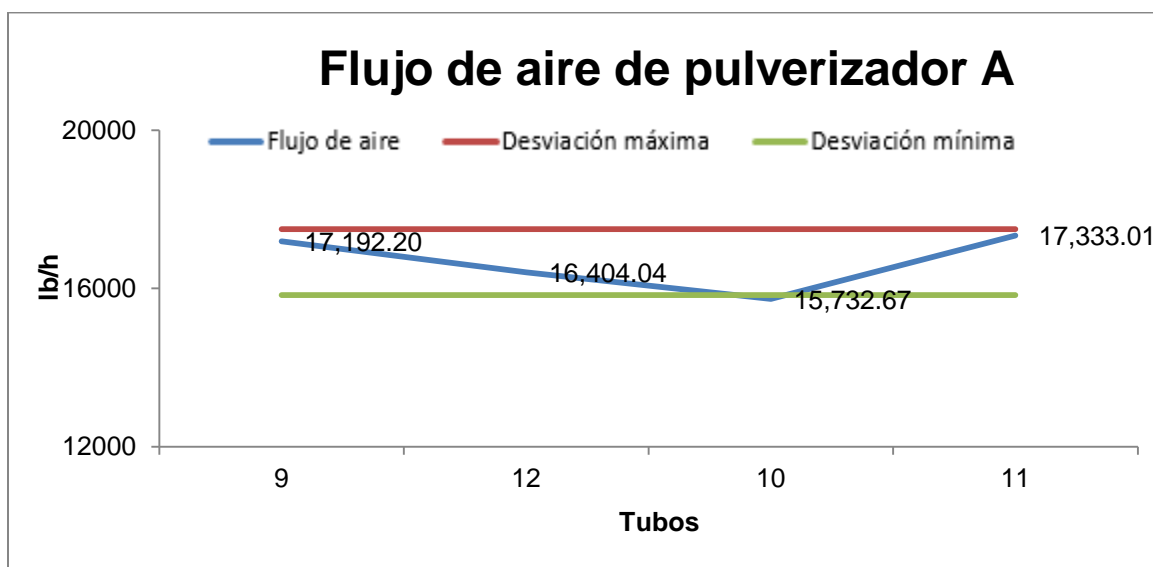
1. Pulverizador A. Los resultados obtenidos del muestreo final realizado en el pulverizador A son los siguientes:

Tabla 12 Desviación de flujo de aire final de pulverizador A

| Desviación por lado del flujo de aire del pulverizador | | | 0.80% |
|--|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Pipe No. | Flujo de aire (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 5 %) | Desv/Lado |
| 9 | 17192.19833 | 3.160543439 | 50.40% |
| 12 | 16404.04103 | -1.568737439 | |
| 10 | 15732.66674 | -5.597270394 | 49.60% |
| 11 | 17333.00845 | 4.005464393 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 32 Flujo de aire final de pulverizador A



Fuente: Unidad generadora 2016

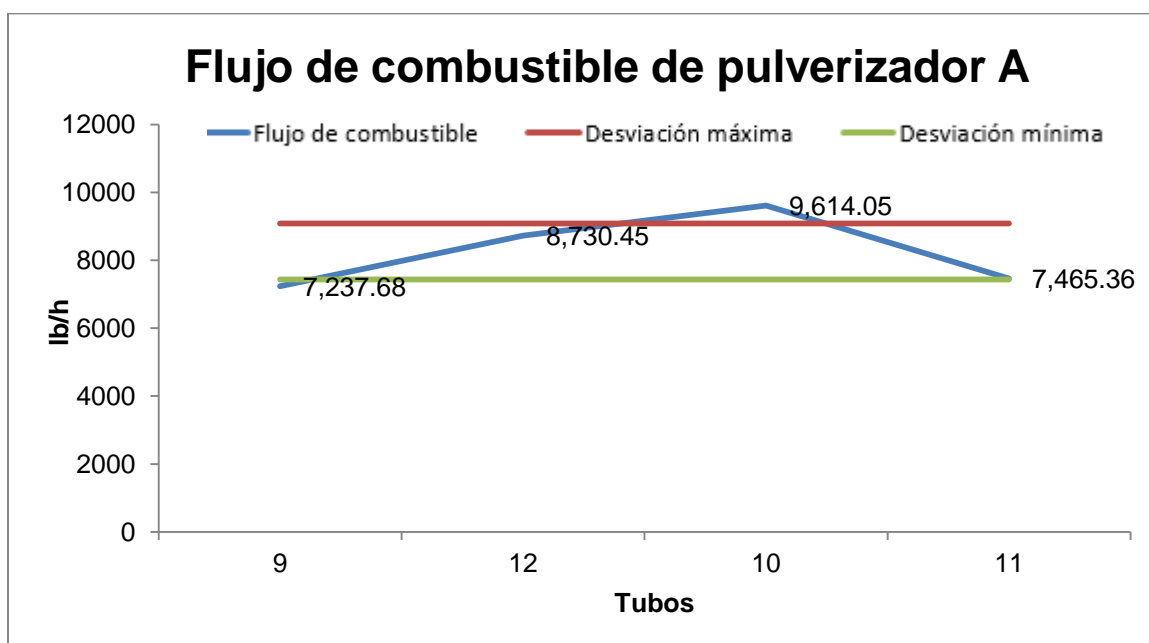
En la Tabla 12 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador, los flujos de aire y las desviaciones del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador A, observando que únicamente la desviación del flujo de aire del tubo 10 supera el parámetro de control del $\pm 5\%$ de operación aceptable. Asimismo se observa una desviación por lado del flujo de aire en el pulverizador de 0.80% mejorando notablemente respecto a la desviación por lado inicial la cual fue de 5.09%. En la Figura 32 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible, observando que los flujos de combustible de los cuatro tubos mejoraron considerablemente al permanecer dentro de las líneas límites de las desviaciones aceptadas, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se consideró como balanceado el flujo de aire en el pulverizador.

Tabla 13 Desviación de flujo de combustible final de pulverizador A

| Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador | | | 3.36% |
|---|-----------------------------|----------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de combustible (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 10%) | Desv/Lado |
| 9 | 7237.67876 | -12.39676963 | 48.32% |
| 12 | 8730.450005 | 5.671396633 | |
| 10 | 9614.049953 | 16.36629101 | 51.68% |
| 11 | 7465.364071 | -9.640918009 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 33 Flujo de combustible final de pulverizador A



Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 13 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador, los flujos de combustible y las desviaciones finales del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador A, observando que la desviación del flujo de combustible del tubo 9 y 10 superan el parámetro de control del $\pm 10\%$ de operación aceptable. Sin embargo a pesar de que se consideró como balanceado el flujo de aire en el pulverizador, en la Figura 33 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible, observando que el flujo de combustible del tubo 9 supera levemente la línea límite de la desviación mínima aceptada y el flujo de combustible del tubo 10 supera la línea límite de desviación máxima aceptada en el pulverizador. Por lo que a partir de lo observado en la gráfica se puede determinar de nuevo que un flujo de aire balanceado no garantiza un flujo de combustible balanceado. Sin embargo la unidad generadora

consideró este último resultado como aceptable, debido a limitaciones de tiempo y personal disponible para realizar más ajustes.

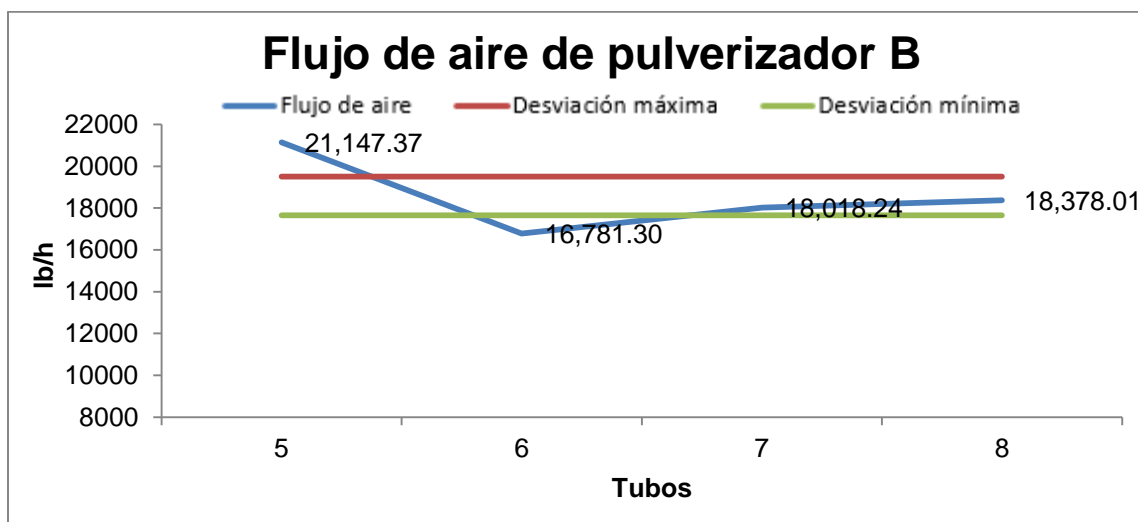
2. **Pulverizador B.** Los resultados obtenidos del muestreo final realizado en el pulverizador B son los siguientes:

Tabla 14 Desviación de flujo de aire final de pulverizador B

| Desviación por lado del flujo de aire del pulverizador | | | 2.06% |
|--|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de aire (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 5 %) | Desv/Lado |
| 5 | 21147.36665 | 13.81038201 | 51.03% |
| 6 | 16781.29866 | -9.686816217 | |
| 7 | 18018.23756 | -3.029888591 | 48.97% |
| 8 | 18378.00942 | -1.093677198 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 34 Flujo de combustible final de pulverizador B



Fuente: Unidad generadora 2016

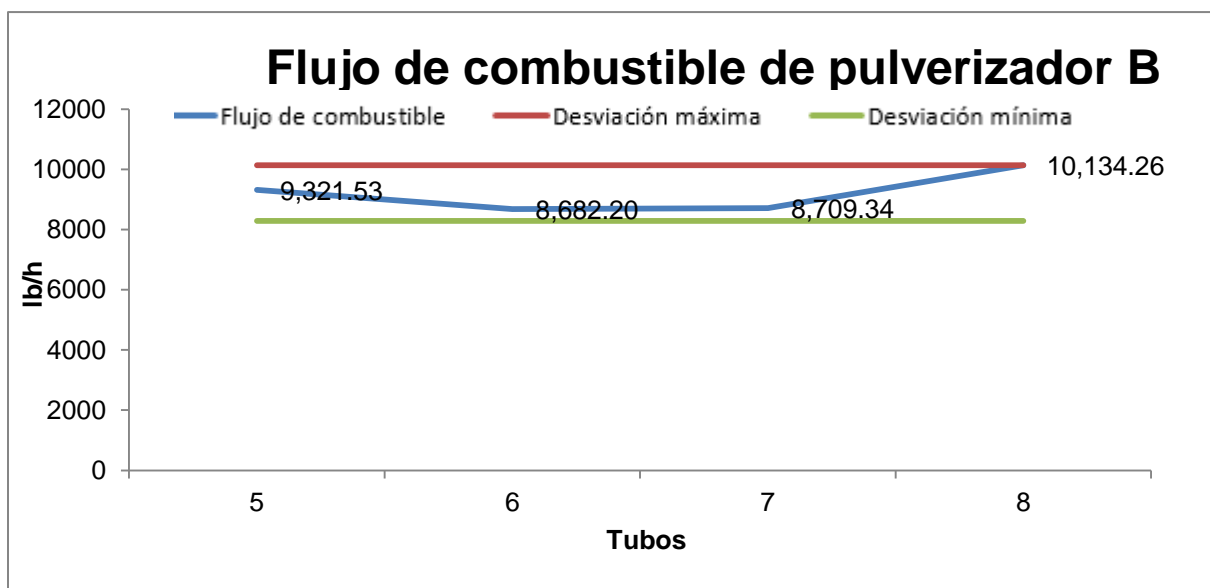
En la Tabla 14 se muestra la desviación por lado del flujo de aire del pulverizador, los flujos de aire y las desviaciones finales del flujo de aire de cada tubo obtenidas del pulverizador B, observando que las desviaciones del flujo de aire del tubo 5 y 6 superan el parámetro de control del $\pm 5\%$ de operación aceptable. Asimismo se observa un aumento en la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador de 2.06% respecto al 0.30% obtenido en el primer muestreo. En la Figura 34 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible, observando que los flujos de combustible del tubo 5 y 6 superan las líneas límites de desviación máxima y mínima aceptables, por lo que de lo observado en la gráfica se puede establecer que existe un desbalance del flujo de aire en pulverizador.

Tabla 15 Desviación de flujo de combustible final de pulverizador B

| Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador | | | 2.28% |
|---|-----------------------------|------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de combustible (lb/h) | Fuel % Desv. (+/- 10%) | Desv/Lado |
| 5 | 9321.527103 | 1.190817203 | 48.86% |
| 6 | 8682.198813 | -5.74947825 | |
| 7 | 8709.340108 | -5.454843066 | 51.14% |
| 8 | 10134.25811 | 10.01350411 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 35 Flujo de combustible final de pulverizador B



Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 15 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador, los flujos de combustible y las desviaciones finales del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador B, a pesar de que se estableció un desbalance del flujo de aire en el pulverizador, se observa que las desviaciones del flujo de combustible de todos los tubos se encuentran dentro del parámetro de control del $\pm 10\%$ de operación aceptable, asimismo se observa una disminución en la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador de 2.28% respecto al 5.74% obtenido en el muestreo inicial. En la Figura 35 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible, observando que todos los flujos de combustible de los cuatro tubos se mantienen dentro de las líneas límites de desviación máxima y mínimas aceptables, por lo que al ser el flujo de combustible el determinante en la unidad, se consideró como balanceado el flujo de combustible en el pulverizador.

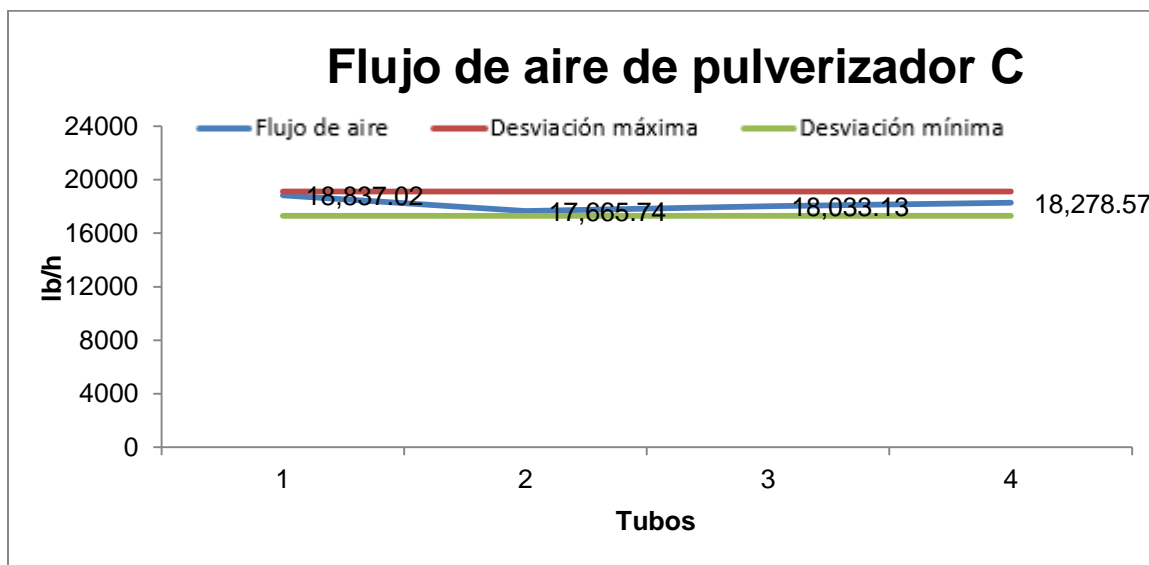
3. Pulverizador C. Los resultados obtenidos del muestreo final realizado en el pulverizador C son los siguientes:

Tabla 16 Desviación de flujo de aire final de pulverizador C

| Desviación del flujo de aire del pulverizador | | | 0.26% |
|---|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de aire (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 5 %) | Desv/Lado |
| 1 | 18837.02445 | 3.47956647 | 50.13% |
| 2 | 17665.74142 | -2.954775657 | |
| 3 | 18033.12928 | -0.936562221 | 49.87% |
| 4 | 18278.57477 | 0.411771408 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 36 Flujo de aire de aire final de pulverizador C



Fuente: Unidad generadora 2016

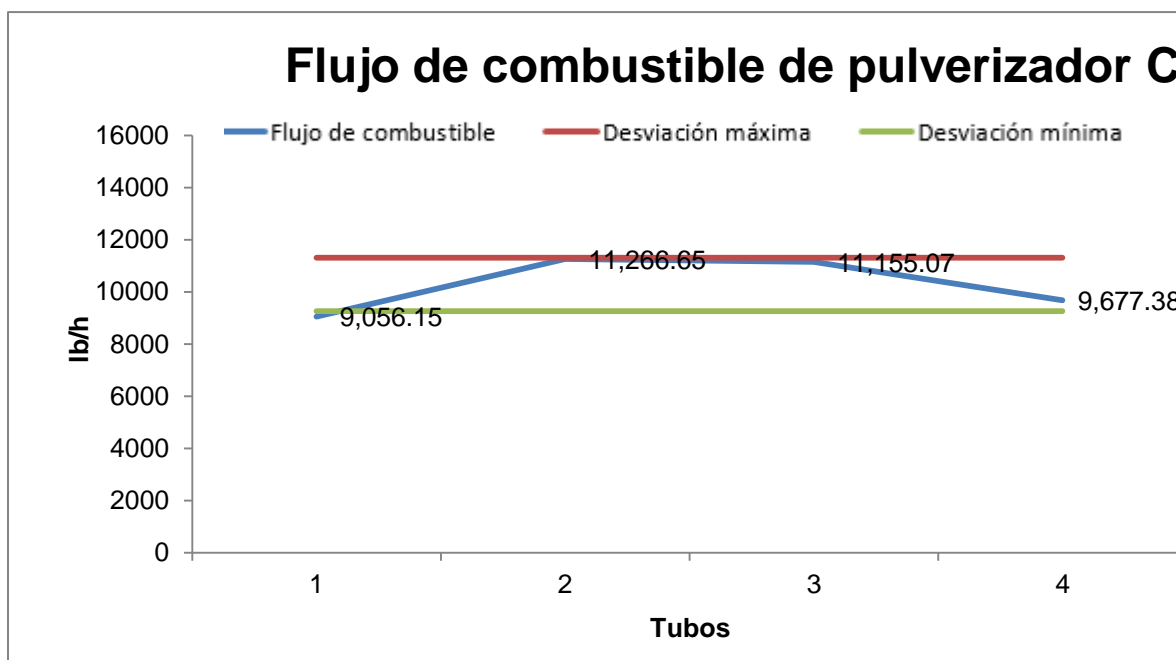
En la Tabla 16 se muestra la desviación por lado del flujo de aire del pulverizador, los flujos de aire y las desviaciones finales del flujo de aire de cada tubo obtenidas del pulverizador C, observando que las desviaciones del flujo de aire de cada tubo se encuentran dentro del parámetro de control del $\pm 5\%$ de operación aceptable, asimismo se observa una disminución en la desviación por lado del flujo de aire del pulverizador de 0.26% mejorando respecto al 1.39% inicial. En la Figura 36 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de aire, observando que los flujos de aire de los cuatro tubos se mantienen dentro de las líneas límites de desviación máxima y mínima aceptables, mejorando considerablemente respecto al resultado del muestreo inicial, por lo que a partir de lo observado en la gráfica se consideró como balanceado el flujo de aire en el pulverizador.

Tabla 17 Desviación de flujo de combustible final de pulverizador C

| Desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador | | | 1.24% |
|---|-----------------------------|------------------------------------|-----------|
| Tubo no. | Flujo de combustible (lb/h) | % Desviación por tubo (+/- 10 %) | Desv/Lado |
| 1 | 9056.145549 | -11.98065509 | 49.38% |
| 2 | 11266.65327 | 9.503920276 | |
| 3 | 11155.07239 | 8.419432842 | 50.62% |
| 4 | 9677.379643 | -5.942698029 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 37 Flujo de combustible final de pulverizador C



Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 17 se muestra la desviación por lado del flujo de combustible, los flujos de combustible y las desviaciones finales del flujo de combustible de cada tubo obtenidas del pulverizador C, observando que únicamente la desviación del flujo de combustible del tubo 1 supera el parámetro de control del $\pm 10\%$ de operación aceptable, asimismo en la Figura 37 se aprecia el gráfico de análisis del flujo de combustible, observando que solamente el flujo de combustible del tubo 1 supera muy levemente línea límite de desviación mínima aceptada. No obstante la desviación por lado del flujo de combustible del pulverizador mejoro de ser 4.11% a 1.24%. Así como los flujos de combustible en la gráfica respecto a los resultados iniciales obtenidos, por lo que la unidad generadora consideró como balanceado el flujo de combustible en el pulverizador.

4. Inquemados (L.O.I) y Nox. Los resultados obtenidos de inquemados (L.O.I) y Nox en los muestreos finales son los siguientes:

Tabla 18 Resultados de inquemados (L.O.I) y Nox final

| Fecha | No. Crisol | Punto de muestreo | Peso muestra 6to Y 7mo. Nivel (gramos) | Inquemados (L.O.I) | | | | | PROMEDIO | Nox Convertido (gr/MMBTU) |
|------------|------------|-------------------|--|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------|---------|----------|---------------------------|
| | | | | Peso crisol vacío Wc (g) | Peso crisol con muestra Wcsd (g) | Peso crisol final Wcsfw (g) | Ceniza (%) | LOI (%) | | |
| 29/06/2016 | 1 | 6 NIVEL ESTE | 89.0 | 16.4124 | 16.9124 | 16.8576 | 89.04 | 10.96 | 6.15 | 214.13 |
| | 2 | | | 17.2645 | 17.7645 | 17.7156 | 90.22 | 9.78 | | |
| | 3 | 6 NIVEL OESTE | 101.0 | 17.9989 | 18.4989 | 18.4862 | 97.46 | 2.54 | | |
| | 4 | | | 17.8687 | 18.1887 | 18.1759 | 96.00 | 4.00 | | |
| | 5 | 7 NIVEL ESTE | 130.0 | 18.5037 | 19.0037 | 18.9738 | 94.02 | 5.98 | | |
| | 6 | | | 17.0866 | 17.5866 | 17.5582 | 94.32 | 5.68 | | |
| | 7 | 7 NIVEL OESTE | 85.0 | 17.6801 | 18.1801 | 18.1629 | 96.56 | 3.44 | | |
| | 8 | | | 17.1729 | 17.6729 | 17.6390 | 93.22 | 6.78 | | |

Fuente: Unidad generadora 2016

En la Tabla 18 se muestran los porcentajes de L.O.I y la lectura de Nox obtenidos en la fecha final de los muestreos realizados en la unidad generadora, observando que el promedio del porcentaje final de L.O.I es de 6.15% disminuyendo un 3.83% respecto al promedio obtenido en la fecha inicial y la lectura de Nox convertido es de 214.13 gr/MMBTU disminuyendo muy poco respecto a la lectura inicial, por lo que a partir de los datos obtenidos se puede afirmar que los desbalances del flujo aire-carbón en los tubos que transportan dichos flujos desde los pulverizadores hacia los quemadores de una caldera de tipo acuotubular para su combustión generan problemas de inquemados y exceso de Nox.

VII. CONCLUSIONES

- La metodología empleada para la medición del flujo de carbón en las tuberías de los pulverizadores es la establecida por la norma ASTM D 1997-87 denominada como muestreo y finesa de carbón pulverizado.
- Se pudo determinar que los parámetros de operación empleados para balancear las velocidades del flujo de aire y de flujo de combustible son: $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$ de desviación respectivamente entre cada línea separada del pulverizador.
- Según Dick Storm PE, las velocidades de aire sucio deben de estar dentro del parámetro de operación de $\pm 5\%$ de desviación, cuando las velocidades de aire sucio no están balanceadas en cada tubería, normalmente el flujo de combustible tampoco lo está. No obstante según lo observado en la Unidad Generadora durante la investigación, esto no siempre se cumple, lo cual se pudo apreciar en los resultados obtenidos del pulverizador B.
- Los parámetros de finesa generalmente requeridos para quemadores de bajo NO_x como los empleados en la Unidad Generadora, requieren primordialmente que un 75% de la muestra pase por el tamiz de malla 200 y el 99.50% pase por el tamiz de malla 50. No obstante se pudo comprobar en la investigación que, a pesar que en 3 de los 12 tubos muestreados, el 75% de la muestra no pasó el tamiz de malla 200 y en 2 el tamiz de malla 50, la Unidad Generadora logra cumplir con niveles aceptables de NO_x.
- El tener balanceados los flujos de combustible en cada línea del pulverizador disminuye el porcentaje de inquemados en la caldera, consiguiendo con ello una mejor combustión del carbón. Según lo indica Innovative Combustion Technologies INC, para que los niveles de inquemados en las cenizas sean $\leq 6\%$ es necesario una buena finura para lograr una óptima combustión. Sin embargo se pudo comprobar que la Unidad Generadora obtuvo un 6.15% de inquemados lo cual está muy cerca del parámetro estándar deseado a pesar que no en todos los tubos se obtuvo la finesa deseada.
- Durante la investigación se pudo observar que el factor humano es primordial en la realización de los muestreos, dado que estos, requieren de mucha precisión tanto en la recopilación de datos como en la toma de muestra isocinética de carbón.

VIII. RECOMENDACIONES

- Evaluar la implementación de un sistema de medición en línea de combustible, velocidad y flujo másico, el cual facilitaría la lectura del comportamiento del flujo de carbón en su transporte y distribución a los quemadores de la caldera y conseguir de esta manera poder realizar los ajustes mecánicos necesarios en tiempo real para corregir los desbalances de una manera más rápida.
- Implementar una placa de control de posición en cada uno de los Dampers con marcas de referencia que indiquen su posición partiendo del centro hacia sus lados norte y sur, para facilitar su lectura y el movimiento de ajuste que se debe realizar para la corrección de desbalances.
- Realizar un levantamiento de medidas del mecanismo de ajuste utilizado en los rifles identificando las posiciones en que se bloquea el flujo de combustible en los tubos de los pulverizadores, con el objetivo de conocer el movimiento preciso que se necesita realizar para bloquear el flujo de combustible en el tubo.
- Evaluar la actualización e implementación de las normas ASTM empleadas por la unidad generadora en los procedimientos de muestreo y finesa de carbón pulverizado, como la del método para obtener la ceniza en la muestra de análisis de carbón respecto a las últimas versiones emitidas.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Angela Neville, JD. (01 de 03 de 2011). *TECO's San José Plant Models Safe and Sustainable Practices*. Obtenido de <http://www.powermag.com/tecos-san-jos-plant-models-safe-and-sustainable-practices/>
- Benitez, Calderon, Escate. (2004). *Proceso de Combustión*. Obtenido de http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/001_cuaderno_electro_nico_unidad_iii.pdf
- Cortés, V. J. (s.f). *Carbón*. Obtenido de <http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf>
- D388-92, A. (s.f). *Fuentes de energía no renovable I*. Obtenido de http://josanna.webs.uvigo.es/pdf/Tecnologia_Energetica/Carbon/TEN-T03_Anexo-Carbon.pdf
- DB RILEY, INC. (1998). Training Manual Central Generadora Electrica. En I. DB RILEY, *Training Manual Central Generadora Electrica* (págs. 1-20).
- Delso Martin, C. (2001). *Energía eléctrica y medio ambiente*. Obtenido de http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/2000/sesion/E_ELECTR.pdf
- Dick Storm PE. (07 de 10 de 2010). *Pulverized coal pipe testing and balancing*. Obtenido de <http://www.powermag.com/pulverized-coal-pipe-testing-and-balancing/>
- Dick Storm PE. (01 de 12 de 2011). *Pulverizers 101: Part III*. Obtenido de <http://www.powermag.com/pulverizers-101-part-iii/>
- Garduño Sánchez, J. L. (s.f). *Planta Termoeléctrica Convencional*. Recuperado el Diciembre de 2016, de <https://es.scribd.com/doc/216893023/Planta-Termoelectrica-pdf>
- Hervás, I. V. (s.f). *Fuentes de Energía, Combustibles fósiles*. Recuperado el Diciembre de 2016, de https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2011/09/fuentes-energia_combustibles-fosiles.pdf
- Innovative Combustion Technologies, Inc. (9 de 1 de 2007). *A summary of experiences related to achieving optimum pulverizer performance and fuel line balance*. Obtenido de [http://www.innovativecombustion.com/pdfs/QRG%205th%20Edition%20Ebook\(2\).pdf](http://www.innovativecombustion.com/pdfs/QRG%205th%20Edition%20Ebook(2).pdf)

Prieto, I. (s.f). *Combustibles*. Recuperado el diciembre de 2016, de http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1003/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT05_Circuitos_de_combustibles.pdf

Prieto, Ismael. (s.f). *Centrales termicas, circuitos de combustibles*. Obtenido de http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1003/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT05_Circuitos_de_combustibles.pdf

Renove Tecnología, S.L. (Abril de 2013). Energiza. *Centrales Termoeléctricas*, 57.

Riley Power Inc. (01 de 04 de 2004). *Coal pulverizer desing upgrades to meet the demands of low Nox burners*. Obtenido de <https://www.babcockpower.com/pdf/RPI-TP-0201.pdf>

Storm Technologies, Inc. (2004). *Quick Reference Guide*. Florida: Naples.
Unidad Generadora. (2004). *Sistema de Pulverizadores*. Escuintla, Escuintla.

X. ANEXOS

A. ANEXO 1

Método de muestreo y finesa de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.01

1. PROPÓSITO

1.1. Al realizar este procedimiento se pueden obtener los siguientes datos:

- 1.1.1. Conocer el flujo de carbón de los tubos del pulverizador
- 1.1.2. Conocer el flujo de aire de los tubos del pulverizador
- 1.1.3. Conocer la relación aire/combustible que posee el sistema de combustión:
 - 1.1.3.1. Relación existente en un tubo particular
 - 1.1.3.2. Relación existente en un pulverizador
 - 1.1.3.3. Relación existente en un quemador específico
- 1.1.4. Conocer la velocidad de aire primario para la combustión.
- 1.1.5. Conocer el balance de aire primario y carbón entre tubos de un pulverizador.
- 1.1.6. Conocer la temperatura y la presión estática de cada tubo de carbón.
- 1.1.7. Obtener una muestra representativa de carbón para el análisis de finesa del carbón pulverizado.

2. ALCANCE

2.1. Este procedimiento se aplica únicamente para muestrear el carbón pulverizado, específicamente en los tubos de carbón pulverizado de los pulverizadores.

3. REFERENCIAS A OTROS DOCUMENTOS

3.1. Procedimientos de la ASTM:
D 1997-87 Método de muestreo y finesa de carbón pulverizado.

4. TIEMPO ESTIMADO PROCEDIMIENTO: no estimado.

5. RESPONSABILIDADES

5.1. Operador Auxiliar y/o Aprendiz: son los responsables de cumplir el procedimiento aquí establecido.

6. DEFINICIONES

6.1. PRUEBA DE AIRE DE MEZCLA: Prueba que está forma por la prueba de temperatura y presión estática y prueba de Dirty Air.

6.2. PRUEBA DE TEMPERATURA Y PRESIÓN ESTÁTICA: Prueba empleada para determinar la temperatura y presión estática del flujo de aire primario en cada tubo del pulverizador.

6.3. PRUEBA DE DIRTY AIR: Prueba empleada para determinar la tasa de muestreo isocinético.

6.4. ISOCINÉTICO: A igual velocidad.

7. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO A UTILIZAR EN EL PROCEDIMIENTO

7.1. SONDA PRUEBA DE TEMPERATURA Y PRESIÓN ESTÁTICA: Esta sonda esta provista de dos conectores, en los cuales se conecta el termómetro y el manómetro digital. Esta sonda se utiliza para la prueba de temperatura y presión estática.

7.2. SONDA PRUEBA DE DIRTY AIR Y SONDA PARA MUESTREO DE CARBÓN: La sonda de prueba Dirty Air tiene dos entradas para el lado de alta y baja presión, esta sonda se utiliza para realizar la prueba de Dirty Air. La sonda para muestreo de carbón es la que se utiliza para recolectar la muestra de carbón pulverizado de cada tubo del pulverizador.

La sonda de Dirty Air y la sonda para muestro de carbón tienen unas marcas distribuidas equitativamente a lo largo de cada sonda, estas longitudes van de acuerdo al código ASME para el desarrollo de pruebas en ductos circulares. A continuación se ejemplifica un caso:

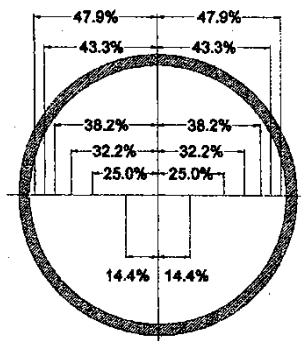
| Diámetro Tubería | 4" & 5" | 6" & 7" | 8" & 9" | 10" & 11" | 12" & > |
|------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| 1 | 0.25 | 0.204 | 0.176 | 0.157 | 0.144 |
| 2 | 0.432 | 0.352 | 0.305 | 0.273 | 0.25 |
| 3 | | 0.456 | 0.395 | 0.352 | 0.322 |
| 4 | | | 0.467 | 0.417 | 0.382 |
| 5 | | | | 0.474 | 0.433 |
| 6 | | | | | 0.479 |

Ejemplo: Se desea analizar el flujo de aire en el tubo del pulverizador el cual posee un diámetro interno de 14", se deberá insertar la sonda completamente en la tubería hasta donde tope la sonda y marcar este punto en la sonda como punto 1. Luego se mide la longitud del conector Dustless, el nipple, el espesor del tubo del pulverizador y la válvula de bola, este será el punto 2 el cual es medido desde la punta de la sonda y debe ser marcado. La distancia entre las dos marcas tendrá que ser muy cercana al diámetro del tubo del pulverizador. Luego debemos encontrar el centro de dicha distancia (entre los dos puntos antes marcados) y marcar la sonda de la siguiente manera:

14" Diámetro interno del tubo del pulverizador:

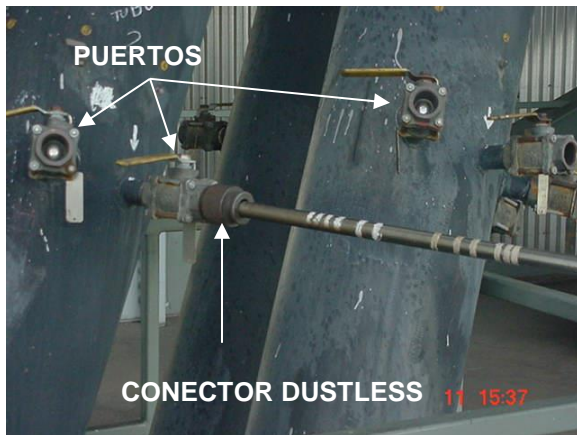
Según Tabla el primer punto es, $14 \times 0.144 = 2.016$, esta distancia será marcada del centro de la sonda hacia sus dos extremos.

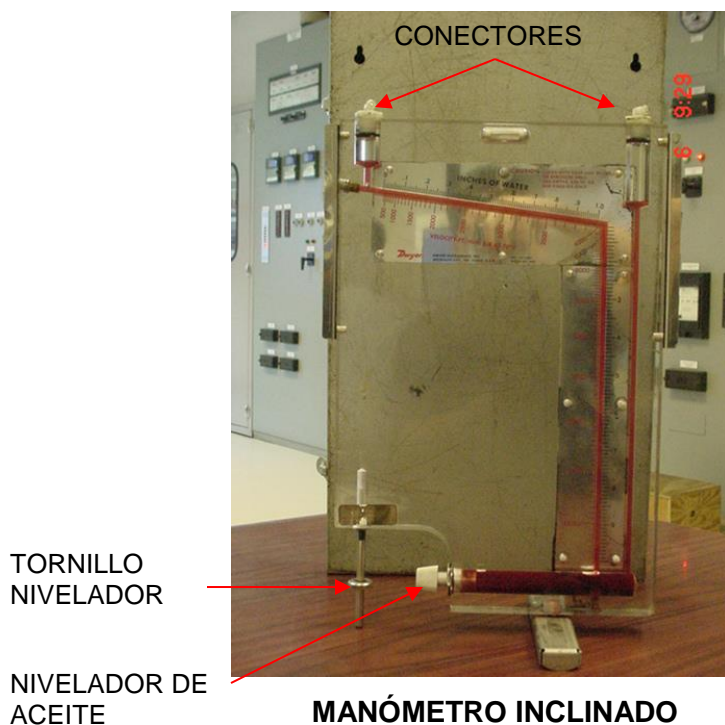
Luego el segundo punto es, $14 \times 0.25 = 3.5$, esta es la distancia a la cual estará el segundo punto, y así sucesivamente los seis puntos que tenemos que marcar en la sonda de prueba.



- 7.3. **CONECTORES DUSTLESS:** Conectores que se instalan en los dos puertos del tubo del pulverizador a muestrear.
- 7.4. **MANÓMETRO INCLINADO:** Instrumento de medición que se utiliza para medir el diferencial de presión y obtener la velocidad del flujo de aire. Este instrumento se utiliza tanto para la prueba de Dirty Air como para el muestreo de carbón pulverizado.
- 7.5. **TERMÓMETRO DIGITAL:** Se utiliza para obtener la lectura de temperatura del flujo de aire en el tubo del pulverizador. Este termómetro digital se debe de conectar a la sonda de prueba de temperatura y presión estática.
- 7.6. **MANÓMETRO DIGITAL:** Se utiliza para obtener la lectura de presión estática del flujo de aire en el tubo del pulverizador. Este manómetro digital se debe de conectar a la sonda de prueba de temperatura y presión estática.
- 7.7. **MANGUERAS DE CONEXIÓN DE ALTA Y BAJA PRESIÓN:** Mangueras flexibles que son utilizadas para ser conectadas en el lado de alta y baja presión del manómetro inclinado, así como también en la sonda de prueba Dirty Air o el nipple
- 7.8. **RECIPIENTE RECOLECTOR DE MUESTRA:** Recipiente de plástico roscado, el cual va conectado al montaje de recolección de muestra de carbón pulverizado.
- 7.9. **BOLSAS DE PLÁSTICO:** Se utilizan para guardar la muestra de carbón pulverizado recolectada.
- 7.10. **FILTRO DE FIBRA DE VIDRIO:** Se utiliza para filtrar el aire que es expulsado por el eyector.
- 7.11. **PISTOLA DE AIRE:** Esta se utiliza para soplar aire comprimido para la limpieza de las mangueras de conexión de alta y baja presión.
- 7.12. **MAZO DE HULE, DESARMADOR PLANO Y PHILLIPS, Y CRONÓMETRO:** Equipo de auxilio utilizado al momento de realizar el procedimiento.







PISTOLA DE AIRE



MAZO DE HULE

8. RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

8.1.1. El procedimiento para el muestreo de carbón método isocinético consiste en dos procedimientos: el procedimiento de aire de mezcla y el muestreo del carbón pulverizado. Primero se realiza el procedimiento de aire de mezcla, el cual se subdivide en dos pruebas, la prueba de temperatura y presión estática y la prueba Dirty Air. En la prueba de temperatura y presión estática, encontramos la temperatura y presión estática de cada tubo del pulverizador. En la prueba de Dirty Air encontramos la presión en distintos puntos del tubo del pulverizador. Por medio de los datos obtenidos de la prueba de temperatura y presión estática y de la prueba Dirty Air, obtenemos un diferencial de presión en cada tubo, el cual nos va a permitir aproximar la velocidad de recolección de muestra en la punta de la sonda de muestreo de carbón con la velocidad que se maneja en el tubo del pulverizado, es por esto que esta prueba se le llama método isocinético.

9. PROCEDIMIENTOS

9.1. PROCEDIMIENTO DE AIRE DE MEZCLA

9.1.1. PROCEDIMIENTO DE TEMPERATURA Y PRESIÓN ESTÁTICA

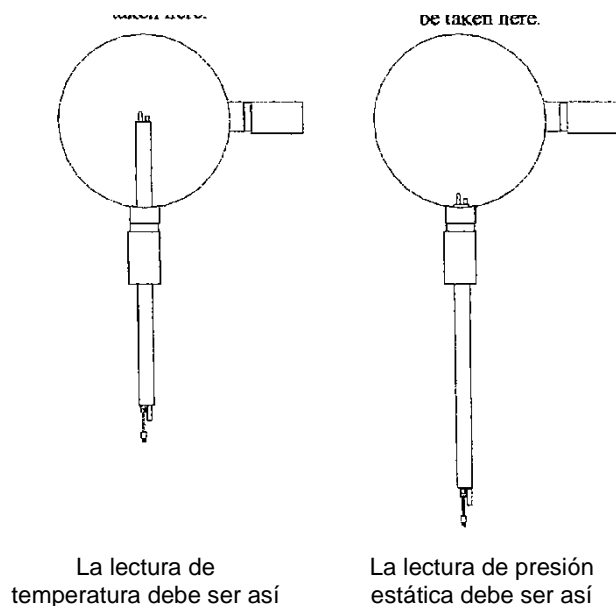
9.1.1.1. EQUIPO A UTILIZAR

- 9.1.1.1.1. La sonda de prueba de temperatura y presión estática
- 9.1.1.1.2. Termómetro y manómetro digital
- 9.1.1.1.3. Dos conectores Dustless
- 9.1.1.1.4. Pistola y manguera para aire comprimido

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-----------|---|--|---|
| 1 | 1 | Anotar en el registro el pulverizador a muestras y la fecha. Solicitar a cuarto de control la presión barométrica, MTph y Air Kpph del pulverizador, Bias de combustible (bias fuel) y bias de aire | | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |
| 2 | 2 | Conectar de manera correcta el termómetro digital | | |
| 3 | 3 | Conectar de manera correcta el manómetro digital a la sonda | | |
| 4 | 4 | Encender el manómetro y ajustarlo en cero y encender el termómetro digital | | |
| 5 | 5 | Conectar al puerto del tubo del pulverizado un conector dustless | | |
| 6 | 6 | Colocar la sonda en el primer puerto con el conector dustless y abrir completamente la válvula de bola | | |
| 7 | 7 | Introducir la sonda hasta la marca central y esperar que lectura del termómetro digital se estabilice, y al estabilizarse registrar la lectura en el registro | La temperatura deberá de estabilizar a aprox 180°F. Ver Figura 1 | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |
| 8 | 8 a | Jalar la sonda hasta que quede en la primera marca y esperar que la lectura del manómetro digital estabilice y registrar la lectura en el registro | En caso la presión no estabilice anotar el promedio de las lecturas observadas. Ver Figura 1 | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-------------------|---|---------------|----------|
| 9 | <p>a</p> <p>9</p> | Sacar la sonda, cerrar la válvula del puerto y desconectar el conector dustless | | |
| 10 | <p>10</p> | Limpiar la sonda con aire comprimido del exceso de carbón que pueda quedarse adherido en la punta de la sonda | | |
| 11 | <p>11</p> | Realizar los paso 5 al 10 con los demás tubos del pulverizador restantes | | |

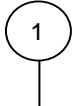
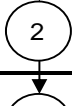
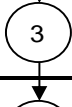
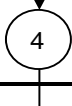
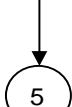
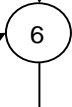
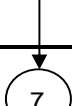
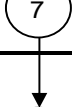
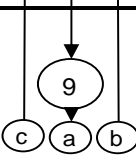
FIGURA 1



9.1.2.PROCEDIMIENTO DE DIRTY AIR

9.1.2.1. EQUIPO A UTILIZAR

- 9.1.2.1.1. Manómetro inclinado
- 9.1.2.1.2. Mangueras para conexión de alta y baja presión
- 9.1.2.1.3. Sonda para prueba Dirty Air
- 9.1.2.1.4. Pistola de aire

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|---|---|---|---|
| 1 |  | Previamente se debe de haber realizado la prueba de clean air de cada tubo del pulverizador ver punto 9.1.1 | | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |
| 2 |  | Asegurar el manómetro inclinado a la estructura de muestreo | | |
| 3 |  | Girar las entradas del manómetro inclinado 3/4 de vuelta | | |
| 4 |  | Conectar el extremo de las mangueras de conexión de alta y baja a la sonda | Ver Figura 2 | |
| 5 |  | Conectar las mangueras de conexión de alta y baja presión en las entradas de alta y baja presión, respetando siempre el lado de alta y baja | Ver Figura 2 | |
| 6 |  | Nivelar el manómetro inclinado por medio del tornillo nivelador y ajustar la lectura del manómetro inclinado en cero | | |
| 7 |  | Conectar un conector dustless al puerto a muestrear | | |
| 8 |  | Colocar la sonda en el primer puerto con el conector dustless y abrir completamente la válvula de bola | | |
| 9 |  | Introducir la sonda hasta la primera marca y esperar que la presión estabilice y registrar la lectura en el registro | Tarda aproximadamente 10 segundos en estabilizarse la lectura del manómetro inclinado, se deberá de comprobar que la lectura sea correcta | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |

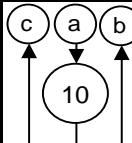







| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|---|--|---|---|
| 10 |  | Continuar con la siguiente marca y así sucesivamente con las doce marcas, como se indica en el paso anterior | | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |
| 11 |  | Al terminar con las doce marcas sacar la sonda y cerrar el puerto | | |
| 12 |  | Desconectar las mangueras de conexión de alta y baja presión del lado del manómetro inclinado y sopletearlas para limpiarlas antes de continuar con el otro puerto | | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |
| 13 |  | Volver a conectar las mangueras de conexión de alta y baja presión en el manómetro inclinado, respetando este orden | Ver Figura 2 | |
| 14 |  | Realizar los pasos del 6 al 13 con el segundo puerto del tubo del pulverizador | El segundo puerto a tomar lecturas se debe de encontrar a 90° ver Figura 3 | |
| 15 |  | Al terminar con el primer tubo del pulverizador, continuar con los tres restantes, como se indica en los pasos 6 al 14 | | |
| 16 |  | Al teminar con todos los tubos llevar los resultados al Ingeniero de Operaciones para que realice los cálculos necesarios y apruebe el análisis | En el caso el Ingeniero de Operaciones no apruebe los resultados se deberá de realizar de nuevo el procedimientos | |
| 17 |  | El ingeniero de operaciones indicará el valor de diferencial de presión (DP) en cada tubo, y anotar este valor en el registro | | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL-LAB.02.O1 |

FIGURA 2

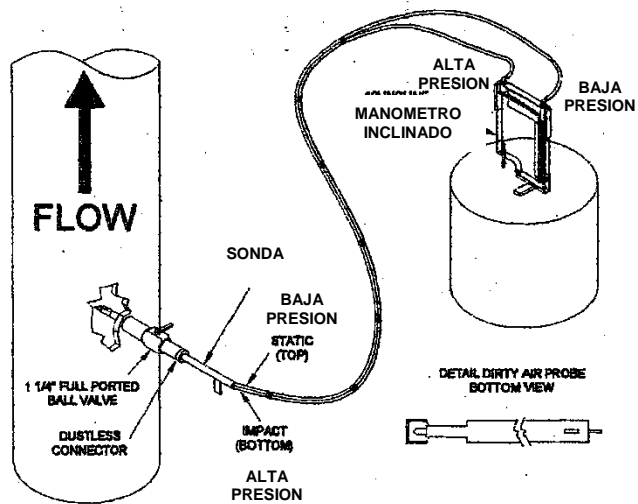
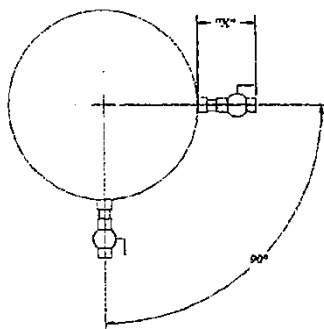









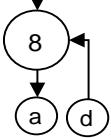
FIGURA 3



9.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE CARBÓN PULVERIZADO

9.2.1. EQUIPO A UTILIZAR

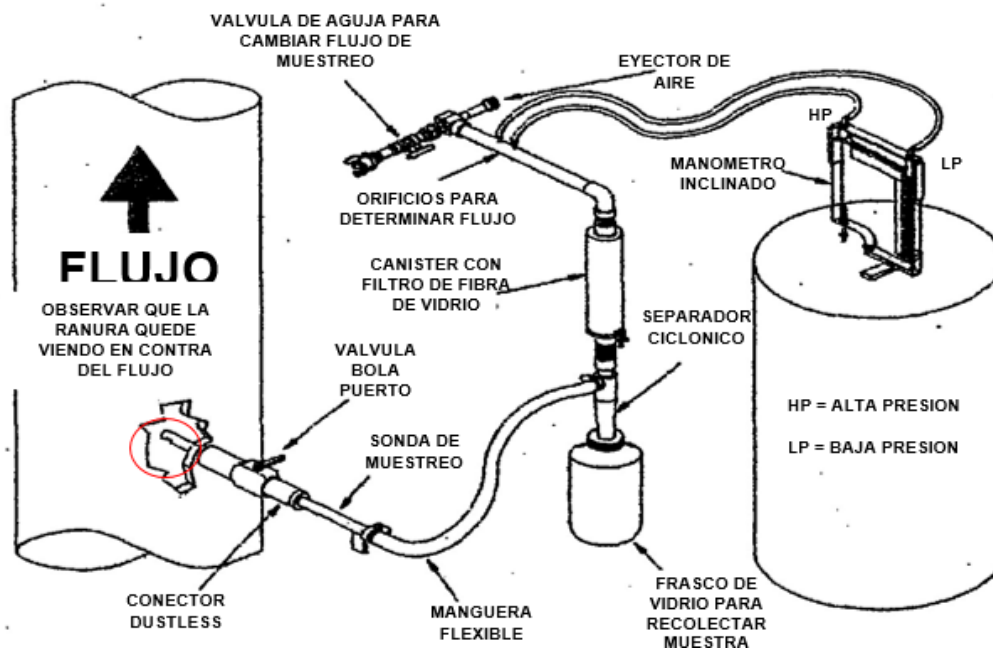
- 9.2.1.1. Sonda para muestreo
- 9.2.1.2. Mangueras de conexión de alta y baja presión
- 9.2.1.3. Manguera para aire con acople rápido
- 9.2.1.4. Estructura para muestreo de carbón
- 9.2.1.5. Manómetro inclinado
- 9.2.1.6. Recipiente colector
- 9.2.1.7. Filtro de fibra de vidrio
- 9.2.1.8. Bolsas plásticas
- 9.2.1.9. Cronómetro

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|---|---|---|---|
| 1 |  | Previo a realizar este procedimiento haber realizado la prueba aire de mezcla | Ver punto 9.1.1 y 9.1.2 | |
| 2 |  | Desarmar la estructura de muestreo, limpiar la estructura, mangueras, frasco recolector, etc; con aire comprimido | | |
| 3 |  | Cambiar el filtro de fibra de vidrio que va insertado en la canasta de la estructura para muestreo y armar de nuevo la estructura | | Muestreo de carbón pulverizado, método isocinético. REG.01.COAL LAB.02.O1 |
| 4 |  | Conectar la manguera de aire con acople rápido al eyector para cambiar de flujo de muestreo | Ver Figura 4 | |
| 5 |  | Conectar la sonda a la estructura de muestreo, esto se realiza por medio de una manguera flexible, asegurada con una abrazadera | Ver Figura 4 | |
| 6 |  | Colocar el recipiente para la recolección de la muestra en el embudo de la estructura de muestreo | Ver Figura 4 | |
| 7 |  | Conectar las mangueras de alta y baja presión primero a la estructura para muestreo | Ver Figura 4 | |
| 8 |  | Nivelar el manómetro inclinado por medio del tornillo nivelador y ajustar la lectura del manómetro en cero | Posiblemente sea necesario agregar o quitar aceite para colocar la medición en cero | |

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-----------|--|--|----------|
| 9 | | Conectar los conectores dustless a los dos puertos del tubo del pulverizador a muestrear | Los dos puertos a muestrear del tubo del pulverizador se debe de encontrar a 90° | |
| 10 | | Colocar la sonda en el puerto y abrir la válvula de aguja de admisión de aire del eyector aprox 1/4 de vuelta | | |
| 11 | | abrir la válvula del puerto completamente e introducir la sonda hasta la primera marca | Tener el cuidado que la ranura de la sonda quede viendo en contra del flujo .Ver Figura 4 | |
| 12 | | Observar la lectura del manómetro inclinado y por medio de la válvula de aguja ajustar el DP que indica el manómetro inclinado al DP calculado por Ing. De Operaciones y mantener la la lectura de Dpen el manómetro inclinado durante 10 segundos | La válvula de aguja se abre o se cierre según la necesidad de aumentar o disminuir el DP en el manómetro inclinado | |
| 13 | | Al terminar los 10 segundo introducir la sonda a la siguiente marcar y volver a realizar los pasos 12 y 13 hasta terminar con los doce puntos | Recordar que con cada nueva marcas el DP (diferencial de presión) se debe modificar como se indica en el paso 12 | |
| 14 | | Al haber terminado con los doce puntos cerrar la válvula de aguja completamente, sacar la sonda y cerrar la válvula del puerto completamente y quitar el conector dustless del puerto | Siempre se debe de cerrar primero la válvula de aguja antes de sacar la sonda para evitar variaciones de presión y que el eyector succione el aceite del manómetro inclinado | |
| 15 | | Desenroscar el frasco de recolección de muestra del embudo y colocar la muestra dentro de una bolsa de plástico | La bolsa de plástico debe identificarse con número de tubo pulverizador y peso de la bolsa sin muestra | |
| 16 | | Colocar la bolsa de plástico con la muestra debajo del embudo y con un mazo de hule dar pequeños golpes al embudo para recolectar la muestra atorada | | |
| 17 | | Limpiar el frasco de recolección de muestra con aire comprimido y colocar de nuevo en su lugar | | |

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-----------|--|---|--|
| 18 | | Realizar los pasos del 8 al 17 con el segundo puerto del mismo tubo del pulverizador | La muestra que se recolecta en este segundo puerto es recolectada en la misma bolsa que se utilizó para recolectar la primera muestra en el primer puerto | |
| 19 | | Al terminar con los dos puertos de un tubo del pulverizador realizar los pasos del 8 al 18 con los siguientes tres tubos del pulverizador faltantes | Para cada muestra de carbón pulverizado de cada tubo se debe de utilizar una nueva bolsa de plástico para guardar la muestra | |
| 20 | | Al terminar de muestrear el o los pulverizadores pesar las muestras recolectadas en el laboratorio y colocar el dato en cada bolsa así como en el registro y sellar la bolsa | | Muestreo de carbón Pulverizado, Método Isocinético REG.01.COAL-LAB.02.O1 |
| 21 | | Llevar los resultados al Ingeniero de Operaciones para que realice los cálculos respectivos del caso | | |

FIGURA 4



10. CÁLCULOS

10.1. ABREVIATURAS

SP_p = Presión estática de la tubería ("wc)
 BP = Presión barométrica ("Hg)
 K = Factor "k" de la sonda
 V_h = Velocidad de cabeza
 Área = Área de la tubería (ft²)
 T = Temperatura en la tubería (°F)
 0.75 = Presión atmosférica estándar

10.2. FÓRMULAS

$$\text{Avg} \sqrt{V_h} = \frac{\sqrt{V_{h1}} + \sqrt{V_{h1}} + \sqrt{V_{h1}} + \dots + \sqrt{V_{hN}}}{N}$$

$$\Delta P = (\text{Avg} \sqrt{V_h})^2 \times (\text{Factor "k" de la sonda})^2 \times 1.573$$

$$\text{Densidad} = \frac{0.075 \times (70 + 460)}{(T + 460)} \times \frac{\frac{SP_p}{13.6} + BP}{29.92} = \text{lbs./ft}^3$$

$$\text{Velocidad} = 1096 \times \frac{\text{Avg} \sqrt{V_h}}{\sqrt{\text{Densidad}}} \times K = \text{ft / min}$$

$$\text{Flujo másico} = \text{Velocidad} \times \text{Densidad} \times \text{Área} \times 60 = \text{lb/h}$$

$$\% \text{ Desviación} = \frac{(\text{velocidad} - \text{Avg Velocidad}) \times 100}{\text{Avg velocidad}} = \%$$

$$\text{Flujo combustible} = \frac{\text{peso de la muestra}}{453.6} \times \frac{60}{4} \times \frac{\text{Área ducto}}{0.0021} = \text{lbs / hr}$$

11. PARÁMETROS DE CONTROL

11.1. Los valores que debemos de obtener al realizar este procedimiento son los siguientes:

- 11.1.1. Balancear el flujo de carbón entre tubos dentro de un ± 10 %
- 11.1.2. Balancear el flujo de aire sucio entre tubos dentro de un ± 5 %
- 11.1.3. Relación aire/combustible de 1.8 libras de aire por libra de carbón
- 11.1.4. Balance entre pulverizadores, masa de aire y carbón dentro de ± 5 %
- 11.1.5. Temperatura de salida de pulverizadores ≥ 155 °F
- 11.1.6. Velocidad mínima en la línea de combustible de 3250 pies/minuto

B. ANEXO 2

Procedimiento de mesh de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.12.R1

12. PROPÓSITO

- 12.1. Determinar la fineza del carbón pulverizado.

13. ALCANCE

- 13.1. Este procedimiento se aplica únicamente para la muestra de carbón pulverizado que ha sido muestreado según el procedimiento de muestreo de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.R1

14. REFERENCIAS A OTROS DOCUMENTOS

- 14.1. Procedimientos de la ASTM:
D 1997-87 Método de muestreo y fineza de carbón pulverizado.
- 14.2. Procedimiento de muestreo de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.R1.

15. TIEMPO ESTIMADO PROCEDIMIENTO: no estimado.

16. RESPONSABILIDADES

- 16.1. *Operador Auxiliar y/o Aprendiz*: son los responsables de cumplir el procedimiento aquí establecido

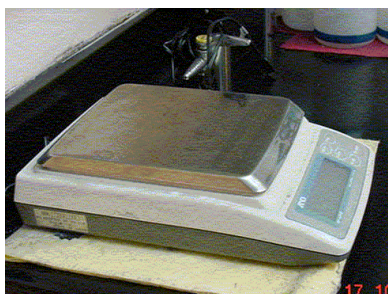
17. DEFINICIONES

- 17.1. **AZUFRE**: El análisis de azufre se utiliza para evaluar las emisiones potenciales de la combustión del carbón, así como también para evaluar la calidad del carbón.

18. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO A UTILIZAR EN EL PROCEDIMIENTO

- 18.1. **BALANZA SEMI-ANALÍTICA**: Una balanza con la suficiente capacidad para pesar las bandejas y la muestra de carbón.
- 18.2. **HORNO SECADOR DE AIRE**: Un dispositivo para pasar una pequeña corriente de aire caliente sobre la muestra de carbón, y es capaz de mantener una temperatura entre 10 a 15°C (18 a 27°F) sobre la temperatura del laboratorio. El cambio de aire debe de estar a una tasa de 1 a 4 veces el volumen del horno por minuto.
- 18.3. **BANDEJAS PARA EL HORNO SECADOR**: Bandejas de metal no corrosivo con la suficiente capacidad para que la muestra pueda ser esparcida en la bandeja a una profundidad no mayor de 1 pulgada.
- 18.4. **RIFFLE**: Un dispositivo manual para dividir la muestra de carbón, en el cual se alimenta en la parte superior el carbón y por medio de unas rejillas divide la muestra en dos partes.

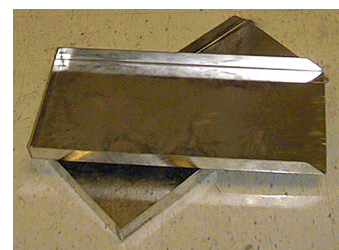
- 18.5. BANDEJA PARA TAMIZADO: tamiz de 8" de diámetro con las medidas de mesh No. 50, 100, 140, 200.
- 18.6. BANDEJA PARA TAMIZADO TIPO SARTÉN: 8" de diámetro, se utiliza para recolectar en el fondo el carbón pulverizado que pasa por el tamiz más fino.
- 18.7. TAPADERA PARA LAS BANDEJAS DE TAMIZADO: Se utiliza para tapar las bandejas para tamizado al momento de realizar el tamizado
- 18.8. AGITADOR MECÁNICO RO-TAP SHAKER: Es un agitador mecánico que se utiliza para tamizar el carbón pulverizado, y está diseñado para proporcionar movimientos circulares y pequeños golpes.



**BALANZA
SEMIANALÍTICA**



**HORNO SECADOR
DE AIRE**



**BANDEJAS HORNO
SECADOR DE AIRE**



RIFFLE

**BANDEJAS PARA
TAMIZADO**

**BANDEJAS TIPO
SARTÉN**












TAPADERA



**AGITADOR MECÁNICO
RO-TAP SHAKER**

19. PROCEDIMIENTO

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|---|--|---|----------|
| 1 |  | Obtener la muestra de carbón pulverizado según procedimiento de muestreo de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.R1 | | |
| 2 |  | La muestra de carbón pulverizado primero debe ser pasada por el riffle | | |
| 3 |  | Las mitades que quedan en los contenedores del riffle deben de ser recombinados nuevamente, para luego ser pasada de nuevo en el riffle | | |
| 4 |  | Realizar los paso 2 al 3 mínimo 2 veces | | |
| 5 |  | Al terminar de mezclar la muestra volver a pasar la muestra por el riffle y solamente tomar el carbón pulverizado en uno de los contenedores del riffle | | |
| 6 |  | Volver a pasar por el riffle lo recolectado en el paso anterior. Realizar los pasos 5 al 6 hasta que la muestra quede dividida a aprox 500 g, a esta muestra le llamaremos la muestra de laboratorio | La muestra puede ser almacena y sellada para su posterior análisis de mesh | |
| 7 |  | Realizar los pasos del 2 al 6 con las demás muestras de carbón pulverizada | | |
| 8 |  | Colocar las muestras de laboratorio obtenidas en los pasos anteriores sobre las bandejas del horno secado y poner las muestras a secar a 90-95 °F durante 18 a 24 hrs | Asegurarse de anotar claramente a que tubo corresponde cada bandeja del horno secador | |
| 9 |  | Durante el periodo de secado de las muestras limpiar el riffle y las bandejas de tamiz mesh 50,100, 140,200, así como el sartén y la tapadera, para los dos juegos de bandejas | | |

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-----------|---|--|--|
| 10 | | Después de haber limpiado las bandejas para tamizar pesar cada bandeja de tamiz mesh No. 50, 100, 140, 200 y bandeja tipo sartén en la balanza analítica y registrar cada lectura como "peso de bandeja vacía" (A), realizar esto para los dos juegos de bandejas | | Hoja de resultados de análisis de carbón pulverizado REG.04.COAL-LAB.02.R1 |
| 11 | | Apilar cada bandeja de tamiz una sobre la otra en el siguiente orden, mesh 50, 100, 140, 200 y bandeja tipo sartén | La bandeja mesh No. 50 es la que se debe de encontrar en la parte de arriba | |
| 12 | | Al terminar el período de calentamiento pasar el contenido de una bandeja en el riffle para homogenizar y realizar varias pasadas por el riffle hasta dividir la muestra de laboratorio a aprox 50 a 100 g de carbón pulverizado | Tener cuidado de alimentar el carbón al riffle de tal forma que fluya en forma uniforme sobre todo todas las aperturas del riffle, evitando alimentar un chorro delgado que pueda pasar de largo a través del riffle | |
| 13 | | Pesar aproximadamente entre 45 a 50 ± 0.05 g sobre la bandeja de Mesh 50. Anotar la lectura como "peso de la muestra" (B). Tapar el Mesh 50 con la tapadera | | Hoja de resultados de análisis de carbón pulverizado REG.04.COAL-LAB.02.R1 |
| 14 | | Realizar los mismos pasos del 12 al 13 con otra bandeja, teniendo el cuidado de limpiar el riffle antes de volverlo a utilizar. | En el caso del segundo juego de bandejas, la bandeja tipo sartén del juego superior actúa como tapadera del juego inferior | |
| 15 | | Colocar todos los juegos de bandejas en el equipo Ro-Tap Shaker y poner la tapadera en la parte superior con el corcho hacia arriba. Dejar caer el brazo sobre esta tapadera | | |

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-----------|--|--|----------|
| 16 | | Poner a trabajar el Ro-Tap Shaker durante 30 minutos usando el timer | | |
| 17 | | Al terminar el periodo, pesar cada bandeja según el número de mesh, y registrar la lectura como "peso final bandeja" (C). Empezar con la bandeja de arriba | Cuando se desacople cada bandeja, ANTES DE PESARLA debe limpiarse la parte inferior, para que las partículas que hayan pasado a través de ella caigan sobre la bandeja de abajo. | |
| 18 | | Desechar la muestra y limpiar las bandejas y el riffle, realizar los pasos del 10 al final con las otras bandejas, hasta terminar con todas las bandejas | | |

20. CÁLCULOS

20.1. Para obtener el porcentaje que es retenido en cada mesh se utiliza la siguiente fórmula:

$$20.1.1. \text{ Porcentaje que es retenido en mesh \#} = \frac{(A - C)}{B}$$

Donde

A = Peso de bandeja vacía, ver paso 10, gramos

B = Peso de la muestra, paso 13, gramos

C = Peso final bandeja, paso 17, gramos

20.2. Los resultados de este procedimiento deben de ser presentados de la siguiente manera:

| Retenido en Mesh # | Pasando Mesh # | Porcentaje (%) |
|---------------------|----------------|----------------|
| No. 50 | --- | |
| No. 100 | No. 50 | |
| No. 140 | No. 100 | |
| No. 200 | No. 140 | |
| Bandeja tipo Sartén | No. 200 | |

21. PARÁMETROS DE CONTROL

21.1. Para el carbón pulverizado de la planta los siguientes resultados son los deseados:

| Retenido en Mesh # | Pasando Mesh # | Porcentaje (%) |
|---------------------|----------------|----------------|
| No. 50 | --- | =< 0.1 |
| No. 100 | No. 50 | |
| No. 140 | No. 100 | |
| No. 200 | No. 140 | |
| Bandeja tipo Sartén | No. 200 | >= 75 |

C. ANEXO 3

Método para obtener la ceniza en la muestra de análisis de carbón PG.04.COAL-LAB.06.R1

1. PROPÓSITO

- 1.1. Obtener el porcentaje (%) de ceniza del carbón

2. ALCANCE

- 2.1.1. Este procedimiento se aplica únicamente para la muestra de análisis de carbón obtenido según el procedimiento de preparación de la muestra de análisis PG.04.COAL-LAB.03.R1. o para la muestra de carbón seca que se obtiene a partir del procedimiento de % de humedad residual del carbón PG.04.COAL-LAB.04.R1

3. REFERENCIAS A OTROS DOCUMENTOS

- 3.1. Procedimientos de la ASTM
 - i. D 3174-97 Método para obtener la ceniza en la muestra de análisis de carbón
- 3.2. Procedimiento de preparación de la muestra PG.04.COAL-LAB.03.R1
- 3.3. Procedimiento de % humedad residual PG.04.COAL-LAB.04.R1

4. TIEMPO ESTIMADO PROCEDIMIENTO: 8 horas por muestreo

5. RESPONSABILIDADES

- 5.1. Operador Auxiliar y/o Aprendiz: son los responsables de cumplir el procedimiento aquí establecido

6. DEFINICIONES

- 6.1. CENIZA: Residuo inorgánico remanente después de la ignición de sustancias combustible. La ceniza obtenida por medio de este procedimiento, es el residuo remanente después de la combustión del carbón. La ceniza obtenida difiere en composición de los constituyentes inorgánicos en el carbón original. La incineración causa una expulsión de toda el agua, la pérdida de dióxido de carbono proveniente de los carbonatos, la conversión de piritas de hierro en óxidos férricos y otras reacciones químicas. La ceniza, determinada por este método, diferirá en cantidad comparada con la ceniza obtenida en la caldera puesto que las condiciones de incineración influyen la química y la cantidad de ceniza.

7. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO A UTILIZAR EN EL PROCEDIMIENTO

- 7.1. MUFFLA ELÉCTRICA: Se utiliza para la determinación de la ceniza del carbón, debe de estar provista de un adecuado flujo de aire (30-40 litros por minuto) y es capaz de mantener una temperatura regulada entre 700-750 °C. La muffle está programada de tal manera que tiene una secuencia en la cual va incrementando la temperatura hasta llegar a la temperatura deseada.

7.2. CRISOLES: Se utilizan para colocar la muestra de carbón que será puesta en el horno secador y obtener la humedad del carbón. Estos crisoles tienen tapadera de aluminio

7.3. FRASCOS PARA PESAR MUESTRAS: Como su nombre lo indica se utilizan para pesar la muestra que se analizará.

7.4. DESECADOR: Se utiliza para enfriar a temperatura ambiente y libre de humedad cualquier objeto.

7.5. BALANZA ANALÍTICA: Se utiliza para pesar la muestra de carbón a analizar.

7.6. CRONÓMETRO: Se utilizará para tomar el tiempo en que las muestras de análisis de carbón se dejarán dentro de la muffla.

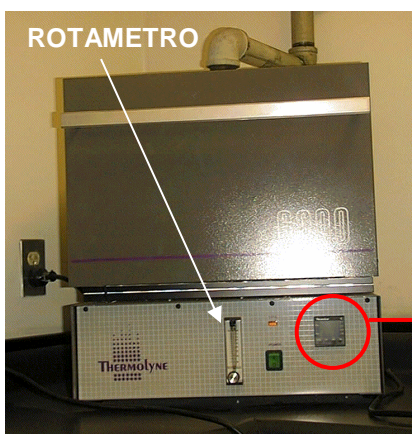


FRASCOS PARA
PESAR MUESTRA

CRISOLES CON
TAPADERA



BALANZA
ANALÍTICA



MUFFLA



DESPLIEGUE DE
LA MUFFLA

**PARÁMETROS PARA EL
PROGRAMA:**

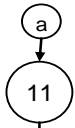









- SÜ-1 = 450
- tN1r = 1.00
- tN1S = 0.00
- SÜ-2 = 750
- tN2r = 1.00
- tN2S = 2.00
- SÜ-3 = 750
- tN3r = 0.00
- tN3S = 0.00
- SÜ-4 = 750
- tN4r = 0.00
- tN4S = 0.00



DESECADOR

8. PROCEDIMIENTO

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|-----------|---|-------------------------------------|---|
| 1 | 1 | Obtener las muestras de análisis de carbón según el procedimiento de preaparación de la muestra de análisis PG.04.COAL-LAB.03.R1 | | |
| 2 | 2 | Asegurarse que la muflla se encuentre a temperatura ambiente y conectar el flujo de aire entre 30-40 litro por minuto | | |
| 3 | 3 | Pesar en la balanza analítica los crisoles vacíos y con tapadera y anotar el no. De crisol, identificación de muestra y "peso de crisol vacío" (A) en el registro | Anotar el peso en g y con 4 dígitos | Hoja de resultados de análisis de carbón sin pulverizar REG.04.COAL-LAB.01.R1 sección CENIZA EN EL CARBON METOD D3174 |
| 4 | 4 | Pesar aproximadamente 1 g de muestra en un frasco para pesar muestra | | |
| 5 | 5 | Pasar la muestra de 1g a los crisoles y tapar los crisoles rápidamente | | |
| 6 | 6 | Pesar en la balanza analítica los crisoles con muestra y tapadera y anotarlo en el registro como "peso de crisol con muestra" (B) | Anotar el peso en g y con 4 dígitos | Hoja de resultados de análisis de carbón sin pulverizar REG.04.COAL-LAB.01.R1 sección CENIZA EN EL CARBON METOD D3174 |
| 7 | 7 | Colocar los crisoles dentro de la muflla y quitarle la tapadera a los crisoles y luego cerrar la muflla | | |
| 8 | 8 | Iniciar la secuencia de calentamiento de la muflla de la siguiente manera | | |
| 9 | 9 | Presionar la tecla "SEL" en el panel de la muflla por un par de segundos hasta que se desplieguen una teclas | | |
| 10 | 10 a | Presionar la flecha ▼ cinco veces hasta que la línea roja se lea "PROG" y en la línea verde "OFF" | | |

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|---|---|---|---|
| 11 |  | Después presiona la flecha ► una sola vez, con lo que la línea verde empezará a titilar | | |
| 12 |  | Presionar la flecha ▲ una vez hasta que la línea verde diga "RUN" | | |
| 13 |  | Presionar de nuevo la flecha ► para que la línea verde deje de titilar | | |
| 14 |  | Cuando ya se tenga el valor deseado de "PROG" en "RUN", presionar nuevamente la tecla "SEL" para que el display vuelva a mostrar los valores de temperatura | En este momento la muffla iniciará el programa, INICIAR. EL CRONOMETRO EN ESE MOMENTO | |
| 15 |  | Dejar que la muffla siga su secuencia de tiempos y temperatura programados | | |
| 16 |  | Cuando hayan transcurrido cuatro horas en el cronómetro, abrir la muffla y tapar los crisoles | | |
| 17 |  | Transferir los crisoles tapados al desecador | | |
| 18 |  | Dejar que los crisoles se enfríen hasta temperatura ambiente | | |
| 19 |  | Al momento en que los crisoles estén a temperatura ambiente, sacarlos del desecador y pesarlos en la balanza analítica con tapadera. Anotar el "peso de crisol con ceniza" (C) en el registro | Anotar el peso en g y con 4 dígitos | Hoja de resultados de análisis de carbón sin pulverizar REG.04.COAL-LAB.01.R1 sección CENIZA EN EL CARBON METOD D3174 |
| 20 |  | Apagar la muffla y cortar el suministro de aire al terminar el análisis | | |

9. CÁLCULOS

9.1. Para obtener el porcentaje (%) de ceniza en la muestra de análisis se utiliza la siguiente fórmula

$$9.1.1 \text{ Porcentaje ceniza en la muestra de análisis} = \frac{(C - A)}{(A - B)} \times 100$$

Donde:

A = Peso del crisol vacío y con tapadera (g)

B = Peso del crisol con muestra de análisis y tapadera (g)

C = Peso del crisol con ceniza y tapadera (g)

D. ANEXO 4

Guía básica de operación para corrección de desbalances.

1. PROPÓSITO

1.1. Realizar el balanceo de los tubos de salida de los pulverizadores hacia los quemadores, tanto por lado del pulverizador como por tubos.

2. ALCANCE

2.1. El alcance de esta guía es establecer los valores de desbalances en los tubos de carbón para realizar los ajustes en Dampers y Riffles para la corrección de dicho problema.

3. REFERENCIAS A OTROS DOCUMENTOS

3.1. Procedimientos de la ASTM:

D 1997-87 Método de muestreo y fineza de carbón pulverizado.

4. TIEMPO ESTIMADO PROCEDIMIENTO: no estimado.

5. RESPONSABILIDADES

5.1. Los encargados de cumplir con los ajustes establecidos en esta guía son el Operador Auxiliar y/o Aprendiz encargados del muestreo, bajo la decisión de criterio del ingeniero de operaciones.

6. DEFINICIONES

6.1. DAMPER: Es una válvula o placa que regula el flujo de aire dentro de un conducto. Por su parte en la unidad el damper es utilizado para realizar el balanceo del flujo de carbón en ambos lados del pulverizador, identificados como Norte y Sur.

6.2. RIFFLE: Es una estructura metálica de forma triangular, compuesta por una serie de placas verticales fijas espaciadas entre sí y una serie de barras horizontales ajustables situadas en la parte inferior de la estructura. El riffle es utilizado para repartir la mezcla de aire-carbón en cantidades iguales entre los diferentes tubos del pulverizador de un mismo lado.

7. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO A UTILIZAR EN EL PROCEDIMIENTO

- 7.1. CINTA MÉTRICA: Es un instrumento de medida que consiste en una cinta flexible graduada, utilizada para fijar la medida deseada en la carrera de los tornillos empleados por los mecanismos ajustables de Dampers y Riffles.
- 7.2. LLAVE INGLESA O AJUSTABLE: Es una herramienta manual utilizada para aflojar o ajustar las tuercas de los tornillos de los mecanismos ajustables de Dampers y Riffles.
- 7.3. ESCALERA MÓVIL: Es utilizada para alcanzar la altura necesaria y ajustar las tuercas de las barras ajustables del riffle.

8. AJUSTES DE DAMPER Y RIFFLE

- 8.1. AJUSTE DE DAMPER: El ajuste de damper se realiza en el segundo nivel de caldera a través del mecanismo ilustrado en la Figura 1. El cual se manipula a criterio del ingeniero de operaciones, con el objetivo de corregir los desbalances entre lados del pulverizador, teniendo cuidado de no afectar la temperatura del pulverizador para que no exista riesgo de fuego en el mismo o disparo del alimentador de carbón por una baja temperatura del pulverizador.

Figura 38 Mecanismo de ajuste de Damper



Fuente: Unidad generadora 2016

Con el objetivo de comprender de una mejor manera el criterio de ajuste empleado por el ingeniero de operaciones en el Damper a continuación se muestra un ejemplo:

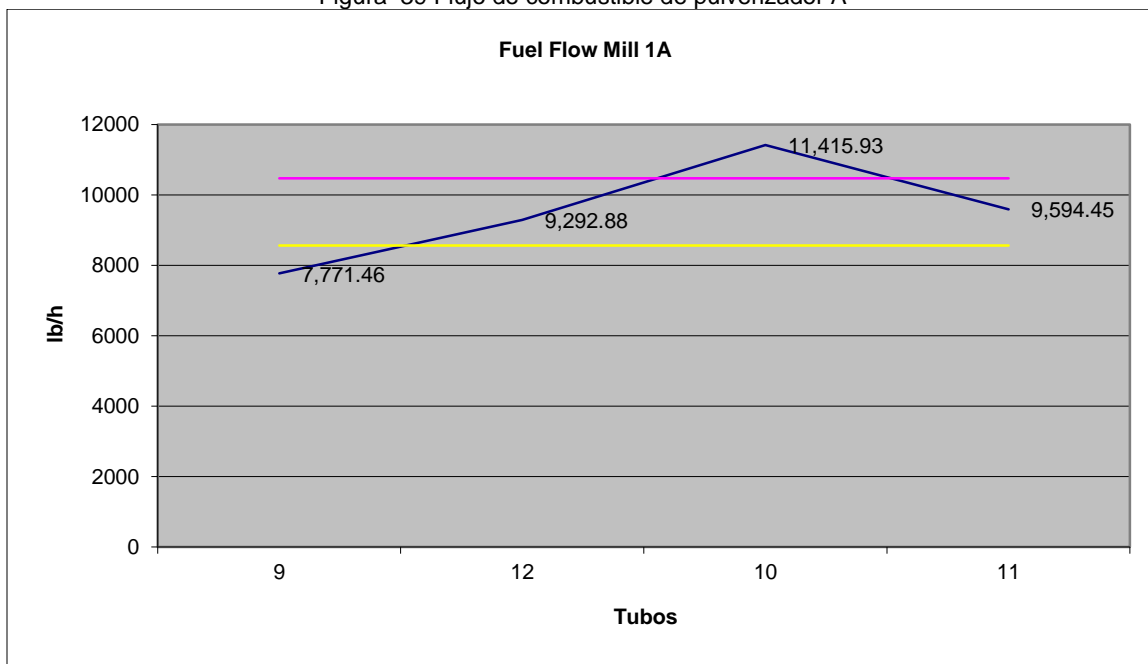
Se desea corregir el desbalance del flujo de combustible del pulverizador A que se observa en la gráfica de la Figura 2. Por lo que se requiere determinar que ajuste se debe de realizar a partir de lo observado en la gráfica. En la Tabla 1 se muestran los resultados de desviación obtenidos del muestreo realizado en el pulverizador.

Tabla 19 Desviación de flujo de combustible pulverizador A

| Fuel Flow Deviations (+/- 10%) | | | 10.36% |
|--------------------------------|------------|--------------|--------|
| Pipe No. | Fuel Flow | Fuel % Dev. | |
| 9 | 7771.45757 | -18.35570868 | 44.82% |
| 12 | 9292.87796 | -2.37218328 | |
| 10 | 11415.9304 | 19.93188389 | 55.18% |
| 11 | 9594.44791 | 0.796008079 | |

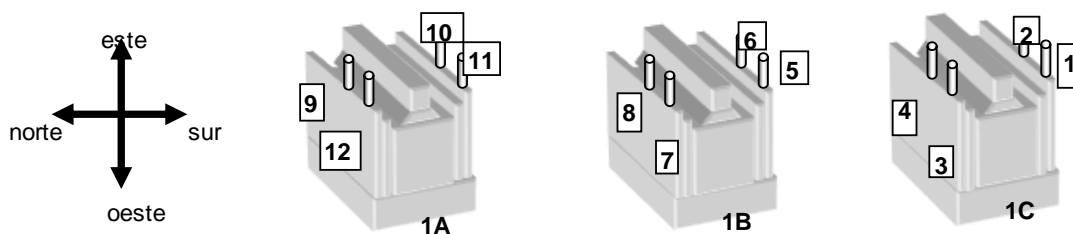
Fuente: Unidad Generadora 2016

Figura 39 Flujo de combustible de pulverizador A



Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 40 Ubicación de tubos en pulverizadores



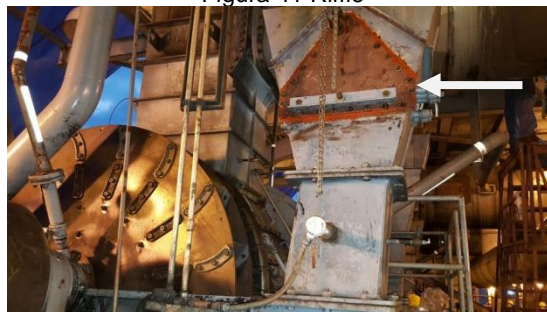
Fuente: Unidad generadora 2016

Previo a analizar la gráfica, la referencia empleada por el ingeniero de operaciones en la decisión de mover damper es observar si la desviación del pulverizador es mayor a 10% en este caso en la Tabla 1 se observa que la desviación del flujo de combustible entre lados del pulverizador es de 10.36% el cual es un indicador de desbalance a corregir con el damper debido a supera la referencia mencionada. Al observar la gráfica de los flujos de combustible del pulverizador en la Figura 2, se observa que el flujo de combustible del tubo 10 supera notoriamente la línea rosa que representa la línea límite de desviación máxima permitida en el pulverizador, por lo que al observar en la Figura 3 que el tubo 10 y 11 pertenecen al lado sur del pulverizador, el ajuste a realizar en este caso es mover levemente el damper hacia el sur, con el objetivo de que el flujo de combustible del tubo 10 disminuya y entre en el rango aceptable del establecido por la gráfica.

Por otro lado si la situación fuera al contrario, es decir que el tubo 12 fuera el más cargado de combustible el ajuste a realizar sería mover el damper hacia el norte.

8.2 AJUSTE DE RIFFLE: El ajuste del riffle se realiza a través del mecanismo de tornillos de las barras ajustables ilustrado en la Figura 41. El ajuste del riffle permite un ajuste más fino de los flujos de carbón entre los tubos de un mismo lado de los pulverizadores. Para el ajuste de los riffles se cuenta con la Tabla 2 que muestra las diferentes posiciones posibles de los riffle de cada pulverizador y los tubos que se bloquean en cada posición a fin de balancear los flujos de combustible.

Figura 41 Riffle



Mecanismo de tornillos de barras ajustables de Riffle

Fuente: Unidad generadora 2016

Tabla 20 Posiciones y bloqueos de tubos

| | |
|----------|--------------------------|
| X | Tubo bloqueado |
| | Tubo desbloqueado |

| Pulverizador A | Tubos | | | | Observaciones |
|----------------|-------|----|----|----|---|
| Distancia | 9 | 12 | 10 | 11 | |
| 8 cm | x | | x | | |
| 7.5 cm | | x | | x | |
| 7 cm | x | | | | Posición neutra del Riffle en el tubo 10 y 11 |
| 6.5 cm | x | | x | | |

| Pulverizador B | Tubos | | | | Observaciones |
|----------------|-------|---|---|---|---------------|
| Distancia | 8 | 7 | 6 | 5 | |
| 7.5 cm | | x | | x | |
| 7 cm | x | | x | | |
| 6.5 cm | x | | x | | |

| Pulverizador C | Tubos | | | | Observaciones |
|----------------|-------|---|---|---|---|
| Distancia | 3 | 4 | 1 | 2 | |
| 8.5 cm | x | | | | |
| 8 cm | | x | | x | |
| 7.5 cm | x | | | x | |
| 7 cm | | x | | x | |
| 6.5 cm | | | x | | Posición neutra del Riffle en el tubo 3 y 4 |

Fuente: Elaboración propia 2016

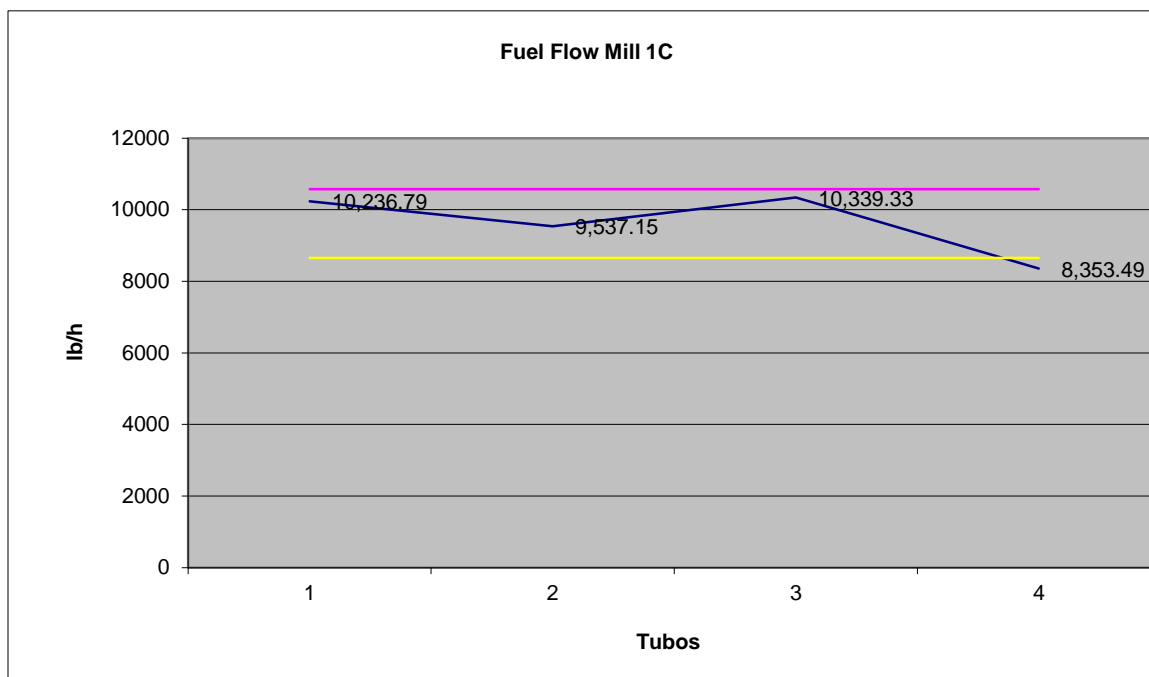
Ejemplo: Se desea corregir el desbalance del flujo de combustible del pulverizador C que se observa en la gráfica de la Figura 5. Por lo que se requiere determinar que ajuste se debe de realizar a partir de lo observado en la gráfica. En la Tabla 3 se muestran los resultados de desviación obtenidos del muestreo realizado en el pulverizador.

Tabla 21 Desviación de flujo de combustible pulverizador C

| Fuel Flow Deviations (+/- 10%) | | | 2.81% |
|--------------------------------|------------|--------------|--------|
| Pipe No. | Fuel Flow | Fuel % Desv. | |
| 1 | 10236.7919 | 6.448198816 | 51.41% |
| 2 | 9537.14962 | -0.827094195 | |
| 3 | 10339.3257 | 7.514405551 | 48.59% |
| 4 | 8353.48757 | -13.13551017 | |

Fuente: Unidad generadora 2016

Figura 42 Flujos de combustible de pulverizador C



Fuente: Unidad generadora 2016














Previo a analizar la gráfica, de las referencias empleadas por el ingeniero de operaciones en la decisión de ajustar raffles es observar si la desviación del pulverizador es menor a 10% y observar las desviaciones por lado, es decir lado norte (Tubo 3 y 4) y lado sur (Tubo 1 y 2) para este pulverizador así como el comportamiento de los flujos en la gráfica, en este caso en la Tabla 3 se observa que la desviación del flujo de combustible del pulverizador es de 2.81% siendo esta una desviación aceptable, sin embargo en las desviaciones por tubo (Fuel % Desv) del lado norte se observa que la desviación del tubo 4 es de -13.13% con un flujo de combustible de 8,353 lb/h y la desviación del tubo 3 es de 7.51% con un flujo de combustible de 10,339.33 lb/h siendo este último el tubo más cargado de carbón del lado norte, observando en la gráfica de la Figura 5 que el flujo de combustible del tubo 4 supera levemente la línea límite de desviación mínima permitida en el pulverizador, por lo que el ajuste a realizar a través de la Tabla 2 es mover el raffle norte de

su posición actual (6 cm) a 7.5 cm esto con el objetivo de bloquear el tubo 3 para que el flujo de combustible del tubo 4 aumente y de esta forma conseguir balancear los flujos para que entren en el rango aceptable establecido por la gráfica.

9. PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE DAMPER Y RIFFLE

9.1. EQUIPO A UTILIZAR

- 9.1.1. Equipo utilizado en procedimiento de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.O1.
- 9.1.2. Computadora de oficina del ingeniero de operaciones.
- 9.1.3. Cinta métrica.
- 9.1.4. Llave inglesa.
- 9.1.5. Escalera móvil.

| PASO | OPERACIÓN | ACTIVIDAD | OBSERVACIONES | REGISTRO |
|------|---|--|----------------------------------|----------------------|
| 1 |  | Verificar las posiciones de Dampers y Riffles registrados en el último muestreo realizado. | | Coalsampling.xlsx |
| 2 |  | Realizar el procedimiento de muestreo de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.O1 en los tres pulverizadores | | PG.04.COAL-LAB.02.O1 |
| 3 |  | Abrir el documento de Excel empleado para realizar los calculos del muestreo | | Coalsampling.xlsx |
| 4 |  | Observar el porcentaje de desviación obtenido del flujo de combustible del pulverizador y Analizar la gráfica generada por el documento de Excel observando el comportamiento de los flujos de combustible dentro del rango de desviaciones permitidas por el $\pm 10\%$. | | |
| 5 |  | Analizar si la desviación del pulverizador es de mayor a 10% ir a "A". Si la desviación es menor a 10% y la desviación por lados es menor a $\pm 10\%$ ir a "B". | | |
| 6 |  | Ajustar Damper a criterio observando a partir de la gráfica hacia que dirección moverlo. | Ver ejemplo de ajuste de Damper | |
| 7 |  | Registrar la medida del movimiento que se realizó en el Damper. | | Coalsampling.xlsx |
| 8 |  | Realizar pasos del 2 al 5 nuevamente. | | |
| 9 |  | Identificar que tubo está más cargado de carbón. | Ver ejemplo de ajuste de Riffle. | |
| 10 |  | Ajustar riffle según Tabla 2, bloqueando el tubo más cargado de carbón | Ver ejemplo de ajuste de Riffle | |
| 11 |  | Registrar la posición del lado del Riffle que se movió. | | Coalsampling.xlsx |
| 12 |  | Realizar pasos del 2 al 5 nuevamente. | | |
| 13 |  | Guardar ajustes finales realizados en dampers y riffles de los tres pulverizadores en el documento de Excel. | | Coalsampling.xlsx |

10. CÁLCULOS

Para obtener los flujos de combustible y las desviaciones de los cálculos utilizados en esta guía se realizan los mismos empleados por el muestreo de carbón pulverizado PG.04.COAL-LAB.02.O1 que son los siguientes:

10.1. ABREVIATURAS

SP_p = Presión estática de la tubería ("wc)
 BP = Presión barométrica ("Hg)
 K = Factor "k" de la sonda
 V_h = Velocidad de cabeza
 Área = Área de la tubería (ft²)
 T = Temperatura en la tubería (°F)
 0.75 = Presión atmosférica estándar

10.2. FÓRMULAS

$$\text{Avg} \sqrt{V_h} = \frac{\sqrt{V_{h1}} + \sqrt{V_{h1}} + \sqrt{V_{h1}} + \dots + \sqrt{V_{hN}}}{N}$$

$$\Delta P = (\text{Avg} \sqrt{V_h})^2 \times (\text{Factor "k" de la sonda})^2 \times 1.573$$

$$\text{Densidad} = \frac{0.075 \times (70 + 460)}{(T + 460)} \times \frac{\frac{SP_p}{13.6} + BP}{29.92} = \text{lbs./ft}^3$$

$$\text{Velocidad} = 1096 \times \frac{\text{Avg} \sqrt{V_h}}{\sqrt{\text{Densidad}}} \times K = \text{ft / min}$$

$$\text{Flujo másico} = \text{Velocidad} \times \text{Densidad} \times \text{Área} \times 60 = \text{lb/h}$$

$$\text{Porcentaje Desviación} = \frac{(\text{velocidad} - \text{Avg Velocidad}) \times 100}{\text{Avg velocidad}} = \%$$

$$\text{Flujo combustible} = \frac{\text{peso de la muestra}}{453.6} \times \frac{60}{4} \times \frac{\text{Área ducto}}{0.0021} = \text{lb/ h}$$

11. PARÁMETROS DE CONTROL

11.1. Los parámetros evaluados en esta guía son los siguientes::

- 11.1.1. Desviación del pulverizador de $\pm 10 \%$
- 11.1.2. Un balance del flujo de combustible entre tubos dentro de un $\pm 10 \%$
- 11.1.3. Relación aire/combustible de 1.8 libras de aire por libra de carbón
- 11.1.4. Temperatura de salida de pulverizadores $\geq 155 \text{ }^\circ\text{F}$
- 11.1.5. Velocidad mínima en la línea de combustible de 3250 pies/minuto

F. ANEXO 6

1. Hoja de resultados-Análisis de mesh del carbón

FECHA DE MUESTREO:

FECHA DEL ANALISIS:

LABORATORISTA QUE REALIZA EL ANALISIS:

HOJA DE RESULTADOS - ANÁLISIS DE MESH DEL CARBÓN

SECADO AL AIRE. MÉTODO D 2013

PULVERIZADOR 1A PROMEDIO HUMEDAD:

TUBO 9

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREADO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 9 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 50 | | | MESH <50 |
| 2 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 3 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 4 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 5 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 10

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREADO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 10 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 6 | 50 | | | MESH <50 |
| 7 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 8 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 9 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 10 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 11

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREADO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 11 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 50 | | | MESH <50 |
| 2 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 3 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 4 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 5 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 12

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREADO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 12 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 6 | 50 | | | MESH <50 |
| 7 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 8 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 9 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 10 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

PULVERIZADOR 1B PROMEDIO HUMEDAD:

TUBO 5

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREADO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 5 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 50 | | | MESH <50 |
| 2 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 3 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 4 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 5 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 6

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREADO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 6 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 6 | 50 | | | MESH <50 |
| 7 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 8 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 9 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 10 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 7

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 7 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 50 | | | MESH <50 |
| 2 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 3 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 4 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 5 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 8

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 8 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 6 | 50 | | | MESH <50 |
| 7 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 8 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 9 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 10 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

PULVERIZADOR 1C

PROMEDIO HUMEDAD: #DIV/0!

TUBO 1

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 1 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 50 | | | MESH <50 |
| 2 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 3 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 4 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 5 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 2

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 2 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 6 | 50 | | | MESH <50 |
| 7 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 8 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 9 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 10 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 3

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 3 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 50 | | | MESH <50 |
| 2 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 3 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 4 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 5 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

TUBO 4

PESOS DURANTE EL MUESTREO:

BOLSA VACÍA (g):

BOLSA CON MUESTRA (g):

MUESTREO (g):

PESOS DURANTE EL SECADO:

BANDEJA 4 NDEJA VACÍA (g):

BANDEJA + MUESTRA INICIAL (g):

BANDEJA + MUESTRA FINAL (g):

% HUMEDAD REMOVIDA:

| No. Bandeja | Mesh ASTM | Peso Bandeja Vacía (g) | Peso Final Bandeja (g) | RESULTADO (%) |
|----------------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| 6 | 50 | | | MESH <50 |
| 7 | 100 | | | PASA MESH 50 |
| 8 | 140 | | | PASA MESH 100 |
| 9 | 200 | | | PASA MESH 140 |
| 10 | sartén | | | PASA MESH 200 |
| Peso muestra (g) --> | | 50.00 | TOTAL 0.00 | % |

% error

G. ANEXO 7

1. Certificado de muestreo y análisis del carbón

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.
Calle 76#54-11,Piso10
Edificio World Trade Center
TEL.: + 57 (5) 3669450
Barranquilla - Colombia



INSPECTORATE

Certificate Nbr 01-24478
Our Ref 16478-1
Slate 16-176

TO : CMC COAL MARKETING COMPANY LTD
SELLER [REDACTED] Cerrejon Ltd c/o CMC Coal Marketing Co. Ltd
VESSEL CSL TARANTAU
SHIPPER CERREJON
CONSIGNEE [REDACTED]
PRODUCT "STEAM COAL IN BULK"
"HULLA BITUMINOSA TERMICA"
LOADING PORT PUERTO BOLIVAR, COLOMBIA
DISCHARGE PORT PUERTO QUETZAL, GUATEMALA
DATE JULY 25th, 2016
QUANTITY 55,750.00 MT

SAMPLING AND ANALYSIS CERTIFICATE

This is to certify that the sampling of this cargo of coal was conducted by **INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.**, According to ASTM standards.

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA., certifies that the following analytical results were established by us, at the laboratory of PUERTO BOLIVAR, COLOMBIA in accordance with the applicable **ASTM** standards:

| CALCULATED COMPOSITE | | |
|--|------|------------------------------|
| LB SO2/MMBTU | | AS RECEIVED |
| LB SO2/MMBTU | | 0.9942 |
| EQUILIBRIUM MOISTURE ASTM - [D-1412-07] | | |
| % Equilibrium Moisture | 8.03 | |
| NET CALORIFIC VALUE ASTM - [D-5865-13] | | AS RECEIVED DRY BASIS |
| NET CALORIFIC VALUE, Btu/Lb | | 10742 12263 |
| NET CALORIFIC VALUE, Kcal/Kg | | 5968 6813 |
| PROXIMATE ANALYSIS | | AS RECEIVED DRY BASIS |
| Total Moisture, pct. wt. ASTM - [D-3302/D3302M-12] | | 11.42 |
| Ash, pct. wt. ASTM - [D-3174-12] | | 10.37 11.71 |
| Volatile matter, pct. wt. ASTM - [D-3175-11] | | 33.63 37.96 |
| Fixed carbon, pct. wt. | | 44.58 50.33 |
| Sulphur, pct. wt. ASTM - [D-4239-14] | | 0.56 0.63 |
| Gross calorific value, Btu/Lb. ASTM - [D-5865-13] | | 11265 12718 |
| Gross calorific value, Kcal/Kg | | 6258 7065 |

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.
 Calle 76#54-11,Piso10
 Edificio World Trade Center
 TEL.: + 57 (5) 3669450
 Barranquilla - Colombia



INSPECTORATE

Certificate Nbr 01-24478
 Our Ref 16478-1
 Slate 16-176

ULTIMATE ANALYSIS

| | AS RECEIVED | DRY BASIS |
|---|-------------|-----------|
| Total Moisture, pct. wt. ASTM - [D-3302/D-3302M-12] | 11.42 | |
| Carbon, pct. wt. ASTM - [D-5373-14] | 62.77 | 70.87 |
| Hydrogen, pct. wt. ASTM - [D-5373-14] | 4.38 | 4.94 |
| Nitrogen, pct. wt. ASTM - [D-5373-14] | 1.33 | 1.50 |
| Ash, pct. wt. ASTM - [D-3174-12] | 10.37 | 11.71 |
| Sulfur, pct. wt. ASTM - [D-4239-14] | 0.56 | 0.63 |
| Chlorine, pct. wt. ASTM - [D-4208-07(2012)] | 0.03 | 0.03 |
| Oxygen, pct. wt. (by diff) | 9.14 | 10.32 |

RESULTS BASED ON WEIGHTED COMPOSITE SAMPLE**MERCURY, Hg(PPM)**

| | AS RECEIVED | DRY BASIS |
|-----------------------------|-------------|-----------|
| Mercury, Hg ASTM D-6722 -11 | 0.050 | 0.057 |

MINERAL ANALYSIS OF ASH,% wt

| | AS IGNITED |
|--|------------|
| Silica, SiO ₂ ASTM - [D-3682(2013)] | 60.76 |
| Alumina, Al ₂ O ₃ ASTM - [D-3682(2013)] | 20.39 |
| Titania, TiO ₂ ASTM - [D-3682(2013)] | 0.93 |
| Ferric Oxide, Fe ₂ O ₃ ASTM - [D-3682(2013)] | 7.94 |
| Lime, CaO ASTM - [D-3682(2013)] | 1.94 |
| Magnesia, MgO ASTM - D-3682(2013)] | 2.37 |
| Sodium Oxide, Na ₂ O ASTM - [D-3682(2013)] | 0.82 |
| Potassium Oxide, K ₂ O ASTM - [D-3682(2013)] | 2.22 |
| Phos. Pentoxide, P ₂ O ₅ ASTM - [D-2795-95] | 0.24 |
| Sulphur Trioxide, SO ₃ ASTM - [D-5016-08e1] | 1.44 |
| Undetermined | 0.95 |

FUSION TEMPERATURE OF ASH OXIDIZING ASTM - [D-1857 M-04(2010)]

| | |
|--|---------|
| Initial deformation temperature, IT | 1349 °C |
| Softening temperature, (H=W),ST | 1409 |
| Hemispherical temperature, (H=1/2W),HT | 1458 |
| Fluid temperature FT. | 1494 |

FUSION TEMPERATURE OF ASH REDUCING ASTM - [D-1857-M-04(2010)]

| | |
|--|---------|
| Initial deformation temperature, IT | 1230 °C |
| Softening temperature, (H=W),ST | 1304 |
| Hemispherical temperature, (H=1/2W),HT | 1349 |
| Fluid temperature FT. | 1448 |

BASIC/ACID RATIO

| | |
|------------------|------|
| Basic/Acid Ratio | 0.19 |
|------------------|------|

SLAGGING INDEX

| | |
|----------------|------|
| Slagging Index | 0.12 |
|----------------|------|

FOULING INDEX

| | |
|---------------|------|
| Fouling Index | 0.15 |
|---------------|------|

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.
 Calle 76#54-11,Piso10
 Edificio World Trade Center
 TEL.: + 57 (5) 3669450
 Barranquilla - Colombia



INSPECTORATE

Certificate Nbr 01-24478
 Our Ref 16478-1
 Slate 16-176

HARDGROVE GRINDABILITY INDEX ASTM - [D-409/D-409M-12]

HGI = 51 at 4.19 Percent of moisture

SILICA VALUE

% Silica Value 83.22

ALKALIES IN ASH

%Na2O 0.82

%K2O 2.22

LB ASH/MMBTU

LB ASH/MMBTU **AS RECEIVED**

9.21

LB S/MMBTU

LB S/MMBTU **AS RECEIVED**

0.4971

PUERTO BOLIVAR, COLOMBIA
 JULY 28th, 2016

For and on behalf of,

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.

FORMATO "SPAC" REV. # 5 04/14

XI. GLOSARIO

Aire primario: Mezcla de aire caliente proveniente de la salida del calentador de aire.

Alimentador: Dispositivo que regula el flujo de combustible procedente de los silos hacia los pulverizadores.

ASME: Abreviatura de American Society of Mechanical Engineers que en español significa sociedad americana de ingenieros mecánicos, la cual es una asociación de profesionales, encargada de generar un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos, en calderas y recipientes sujetos a presión entre otros.

ASTM: Abreviatura de American Society for Testing and Materials que en español significa sociedad americana de ensayo de materiales, la cual es la mayor organización científica y técnica para el establecimiento y la difusión de normas relativas a las características y prestaciones de materiales, productos, sistemas y servicios.

Granulometría: Medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria.

Inquemados: Es el carbón que no se quema durante la combustión.

Nox: Grupo de gases incoloros e inodoros muy reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones.

Pulverizador: Máquina que sirve para triturar, moler, laminar o estrujar materias sólidas.

Quemador: Elementos por donde se inyecta al hogar la mezcla de aire primario y carbón.

Silo: Construcción diseñada para almacenar grano y otros materiales.

Tamiz: Cedazo muy tupido.