



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

**MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO,
EN LA CALDERA No.8 EN EL INGENIO LA UNIÓN**

Saúl Estuardo Hernández Díaz

Asesorado por el Ing. Joel Elías López Mejía

Guatemala, octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO,
EN LA CALDERA No. 8 EN EL INGENIO LA UNIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SAÚL ESTUARDO HERNÁNDEZ DÍAZ

ASESORADO POR EL ING. JOEL ELÍAS LÓPEZ MEJÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova |
| VOCAL V | Br. Henry Fernando Duarte García |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Julio César Molina Zaldaña |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| EXAMINADOR | Ing. Edgar Orlando Pinzón Trangay |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO, EN LACALDERA No. 8 EN EL INGENIO LA UNIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 10 de octubre de 2013.



Saúl Estuardo Hernández Díaz

Guatemala, agosto de 2015.

Ingeniero
Julio Cesar Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio respetuosamente le informo, que he revisado el trabajo de graduación titulado: " **MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO, EN LA CALDERA No. 8 EN EL INGENIO LA UNIÓN**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Saúl Estuardo Hernández Díaz**, quien fue debidamente asesorado y supervisado y después de haber realizado las correcciones pertinentes considero que cumple con los objetivos.

Por lo que habiendo cumplido con los requisitos necesarios extendiendo la aprobación del mismo como Asesor.

Agradeciendo su atención me suscribo de usted.

Atentamente,


Ing. Joel Elias López Mejía
Ing. Mecánico Industrial col. 9177
ASESOR

JOEL ELIAS LOPE. MEJIA
ING. MECANICO INDUSTRIAL
COLEGIADO No. 9.177



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.326.2015

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO, EN LA CALDERA NO. 8 EN EL INGENIO LA UNIÓN** del estudiante **Saúl Estuardo Hernández Díaz** carné No. **1997-12754** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador del Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre de 2015

//aej

Ref.E.I.M.286.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO, EN LA CALDERA No. 8 EN EL INGENIO LA UNIÓN**, del estudiante **Saúl Estuardo Hernández Díaz**, carné No. **1997-12754** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, octubre de 2016
/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **MONTAJE DEL LAVADOR DE GASES, TIPO ELECTROESTÁTICO, EN LA CALDERA No.8 EN EL INGENIO LA UNIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Saúl Estuardo Hernández Díaz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, octubre de 2016

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------|---|
| Dios | Porque de él viene la inteligencia y sabiduría y me ha dado la fuerza para seguir adelante en este hermoso caminar. |
| Mis abuelos | Moisés Hernández y Paula Castañeda, por haberme inculcado el temor a Dios y guiarme por el camino del bien. |
| Mis padres | Saúl Hernández y Sonia Díaz, por ser el medio que el Creador utilizó para yo poder existir. |
| Mi esposa | Licda. Melany Calderón de Hernández, por inyectar en mí el deseo de cada día ser mejor. |
| Mi hijo | Saúl Esteban Hernández Calderón, por ser el nuevo motor que mueve nuestro vivir. |
| Mis hermanas | Zully y Mirna Hernández Díaz, por preocuparse siempre en mi bienestar. |
| Mis tíos | Maclovio, María, Carlos, Rosario y Mario Hernández, por estar siempre a mi lado compartiendo y ser como mis hermanos mayores. |

Mis primos

Silvia y Roberto Méndez, Paola, Rosemary, Leonardo, Paula, Loyda y Betty Hernández, por ser mis amigos.

Mis sobrinos

Erick y Cristian López, por el tiempo compartido.

Familia

Calderón Monterroso

Por acogerme en la familia y desear siempre un mejor futuro a la familia Hernández Calderón.

Mis amigos

Sergio, Estuardo, Ing. Edgar y Manolo Méndez Noriega, Geremías Hernández, Kenneth Vásquez y Herber Muñoz, por todos los momentos convividos, en las distintas etapas de nuestras vidas.

**Toda mi familia
en general**

Por todo el apoyo y muestras de cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por permitirme culminar mi carrera y permitir todo lo que he vivido hasta este momento.
- Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería y Escuela de Ingeniería Mecánica** Por permitirme estudiar y formarme académicamente dentro de este recinto tricentenario que es del pueblo y para el pueblo.
- A mi padre** Por el esfuerzo realizado en todos los ámbitos de su vida para darme siempre lo mejor, Dios te bendiga Saúl Hernández Castañeda.
- A mi hermana** Mirna Elizabeth Hernández Díaz, por aquellos años de apoyo en la búsqueda del lugar adecuado para mi formación educacional.
- A mis amigos** Geremias Hernández por ser la persona que me acompañó en el inicio y final de mi carrera, gracias por esos consejos para un mejor vivir. Kenneth Vásquez por toda tu ayuda en el ámbito estudiantil, profesional y laboral.

Ingenio La Unión

Por abrir sus puertas para la realización de este trabajo de graduación para la culminación de mi carrera, un agradecimiento especial para: los Ings. Ligia Rivas, Edwin Gamboa y Edgar Ochoa, por confiar en mi capacidad para la colaboración del montaje del precipitador electroestático de la caldera No. 8.

Mi asesor

Ing. Joel Elías López Mejía, por toda su colaboración en la realización de este trabajo.

Mi suegro

William Calderón Mendoza, por creer en mi crecimiento profesional y estar siempre a la expectativa de este trabajo.

**Mis amigos y
compañeros de trabajo**

Por su sinceridad, ayuda, consejos y muestras de cariño, definitivamente el trabajo en equipo es necesario para la realización de los proyectos.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XI |
| GLOSARIO | XIII |
| RESUMEN | XXI |
| OBJETIVOS | XXIII |
| INTRODUCCIÓN | XXV |
| | |
| 1. GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1. Descripción de Ingenio La Unión..... | 1 |
| 1.1.1. Ubicación geográfica | 1 |
| 1.1.1.1. Coordenadas geográficas | 1 |
| 1.1.1.2. Clima..... | 2 |
| 1.1.2. Proceso..... | 2 |
| 1.1.3. Cogeneración..... | 3 |
| 1.1.4. Generación | 4 |
| 1.1.5. Proyecto nuevo | 4 |
| 1.2. Calderas..... | 5 |
| 1.2.1. Tipos de calderas | 5 |
| 1.2.1.1. Calderas pirotubulares | 6 |
| 1.2.1.2. Calderas acuotubulares | 6 |
| 1.2.1.3. Calderas de un solo domo | 7 |
| 1.3. Chimeneas..... | 7 |
| 1.3.1. Gases de combustión..... | 8 |
| 1.3.2. Ceniza..... | 9 |
| 1.3.3. Hollín..... | 9 |

| | | |
|--------|---|----|
| 1.4. | Contaminación del aire | 10 |
| 1.5. | Lavadores de gases | 10 |
| 1.5.1. | Filtros | 12 |
| 1.5.2. | Lavadores Venturi..... | 12 |
| 1.5.3. | Cámaras de sedimentación..... | 14 |
| 1.5.4. | Ciclón..... | 16 |
| 1.5.5. | Precipitadores electroestáticos..... | 17 |
| 1.6. | Descripción del problema | 18 |
| 2. | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS COMPONENTES DEL PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO..... | 21 |
| 2.1. | Estructura..... | 23 |
| 2.1.1. | Estructura base..... | 26 |
| 2.1.2. | Estructura campo colector de ceniza | 33 |
| 2.1.3. | Estructura del sistema de aislamiento eléctrico | 36 |
| 2.1.4. | Estructura de los elementos eléctricos..... | 38 |
| 2.2. | Boquillas de entrada y salida del gas | 42 |
| 2.2.1. | Distribuidores del gas | 44 |
| 2.3. | Sistema colector de ceniza..... | 47 |
| 2.3.1. | Placas colectoras..... | 47 |
| 2.3.2. | Electrodos..... | 50 |
| 2.4. | Boquillas de salida de ceniza | 53 |
| 3. | DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO | 57 |
| 3.1. | Características y consideraciones que se van a estudiar | 57 |
| 3.2. | Estructura de los cimientos del precipitador electroestático. ... | 59 |
| 3.3. | Procedimiento del montaje del precipitador electroestático..... | 65 |
| 3.3.1. | Columnas principales | 65 |

| | | | |
|--------|----------|--|----|
| | 3.3.1.1. | Placas intermedias | 69 |
| 3.3.2. | | Boquillas de salida de ceniza | 71 |
| | 3.3.2.1. | Vibradores | 73 |
| | 3.3.2.2. | Sensores | 74 |
| 3.3.3. | | Sistema colector de ceniza..... | 75 |
| | 3.3.3.1. | Placas colectoras | 76 |
| | 3.3.3.2. | Electrodos emisores del campo eléctrico | 79 |
| 3.3.4. | | Boquillas de entrada y salida de gases..... | 82 |
| 3.3.5. | | Estructura para los transformadores | 84 |
| | 3.3.5.1. | Transformadores | 85 |
| 3.3.6. | | Sistema de aislamiento eléctrico | 86 |
| 3.3.7. | | Vibradores de placas colectoras y electrodos emisores | 88 |
| 4. | | MANTENIMIENTO DEL PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO | 90 |
| 4.1. | | Concepto general de mantenimiento..... | 91 |
| 4.2. | | Tipos de mantenimiento..... | 91 |
| | 4.2.1. | Correctivo..... | 92 |
| | 4.2.2. | Planificado | 93 |
| | 4.2.3. | Programado | 93 |
| | 4.2.4. | Organizado | 94 |
| | 4.2.5. | Preventivo | 94 |
| | 4.2.6. | Predictivo | 94 |
| 4.3. | | Programas de actividades de mantenimiento | 95 |
| 4.4. | | Elaboración del plan de mantenimiento | 96 |
| | 4.4.1. | Programa de mantenimiento | 97 |
| | 4.4.1.1. | Registro de equipos..... | 97 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.4.1.2. | Descripción de las actividades de mantenimiento..... | 100 |
| 4.4.1.3. | Plan estratégico..... | 100 |
| 4.4.2. | Fichas de trabajo | 101 |
| 4.4.2.1. | Orden de trabajo | 101 |
| 4.4.2.2. | Solicitud de repuestos y materiales ... | 101 |
| 4.4.2.3. | Reporte semanal de mantenimiento .. | 102 |
| 4.4.3. | Manual de mantenimiento | 102 |
| 4.4.4. | Bodega..... | 102 |
| 4.5. | Mantenimiento en época de reparación | 104 |
| 4.6. | Mantenimiento en época de zafra | 104 |
| 5. | CONTROLES DE LOS INDICADORES DE MANTENIMIENTO | 105 |
| 5.1. | Indicadores de disponibilidad | 105 |
| 5.1.1. | Disponibilidad total..... | 106 |
| 5.1.2. | Disponibilidad por averías | 106 |
| 5.1.3. | Tiempo medio entre fallas | 106 |
| 5.1.4. | Tiempo medio de reparación..... | 107 |
| 5.2. | Indicadores de gestión de órdenes de trabajo | 107 |
| 5.2.1. | Órdenes de trabajo generadas en un tiempo determinado..... | 107 |
| 5.2.2. | Órdenes de trabajo finalizadas..... | 108 |
| 5.2.3. | Órdenes de trabajo pendientes | 108 |
| 5.2.4. | Órdenes de trabajo de emergencia..... | 108 |
| 5.2.5. | Horas estimadas de trabajo pendiente..... | 109 |
| 5.2.6. | Índice de cumplimiento de la planificación | 109 |
| 5.2.7. | Desviación media del tiempo planificado | 109 |
| 5.3. | Indicadores de proporción de tipo de mantenimiento | 110 |
| 5.3.1. | Índice de mantenimiento programado..... | 110 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| 5.3.2. | Índice de mantenimiento correctivo | 111 |
| 5.3.3. | Índice de emergencia | 111 |
| 5.4. | Tiempo de reparación | 112 |
| 5.4.1. | Tiempo de reparación en zafra..... | 112 |
| 5.4.2. | Tiempo de reparación fuera de zafra. | 112 |
| 5.5. | Rutinas de inspección..... | 113 |
| 5.6. | Historial del equipo | 113 |
| CONCLUSIONES | | 115 |
| RECOMENDACIONES..... | | 117 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 119 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Lavador Venturi..... | 14 |
| 2. | Cámara de sedimentación..... | 15 |
| 3. | Lavador ciclón..... | 16 |
| 4. | Precipitador electrostático | 24 |
| 5. | Sección transversal columna principal | 27 |
| 6. | Vista de planta columnas principales | 28 |
| 7. | Columna principal vista lateral..... | 29 |
| 8. | Elevación transversal de la estructura base..... | 31 |
| 9. | Elevación longitudinal de la estructura base | 32 |
| 10. | Columnas del campo colector | 34 |
| 11. | Viga, parte baja del campo colector | 34 |
| 12. | Viga, parte alta campo del colector | 35 |
| 13. | Lámina perimetral | 36 |
| 14. | Columna del sistema de aislamiento..... | 37 |
| 15. | Pared del sistema de aislamiento..... | 38 |
| 16. | Estructura para transformadores..... | 41 |
| 17. | Elevación lateral soportes..... | 42 |
| 18. | Boquilla entrada y salida de gases..... | 43 |
| 19. | Pantallas distribuidoras de gases..... | 46 |
| 20. | Placas colectoras acopladas | 48 |
| 21. | Perfil de placa colectoras 49 | |
| 22. | Herramienta para unir placas colectoras..... | 50 |
| 23. | Electrodos y sus soportes..... | 51 |

| | | |
|-----|--|----|
| 24. | Soporte de los electrodos | 52 |
| 25. | Boquillas descarga de ceniza | 54 |
| 26. | Isométrico de las boquillas | 55 |
| 27. | Plataforma cimientto ESP | 61 |
| 28. | Pedestal, vista de planta | 62 |
| 29. | Vista lateral de pedestal ESP | 63 |
| 30. | Estructura de pedestal..... | 64 |
| 31. | Pedestal finalizado..... | 65 |
| 32. | Montaje de columnas principales | 66 |
| 33. | Protocolo para alineación de columnas | 67 |
| 34. | Amarres columnas principales | 68 |
| 35. | Alineación columnas parte alta..... | 70 |
| 36. | Posición de teflón | 71 |
| 37. | Boquillas salida de ceniza | 72 |
| 38. | Vibradores..... | 73 |
| 39. | Sensor | 74 |
| 40. | Columnas y vigas del sistema colector de ceniza..... | 76 |
| 41. | Protocolo de vigas flotantes | 77 |
| 42. | Placa colectora en posición de trabajo..... | 78 |
| 43. | Plataforma para placas colectoras | 79 |
| 44. | Posición de electrodos..... | 80 |
| 45. | Sistema para instalación de electrodos..... | 81 |
| 46. | Alineación parte baja de los electrodos..... | 82 |
| 47. | Boquilla ensamblada en nivel 0..... | 83 |
| 48. | Montaje de boquillas..... | 84 |
| 49. | Estructura para TR | 85 |
| 50. | Transformadores | 86 |
| 51. | Sistema de soporte y aislamiento..... | 87 |
| 52. | Corte transversal | 88 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 53. | Martillo eléctrico | 89 |
| 54. | Organización del plan de mantenimiento | 97 |
| 55. | Estructuración de equipo en sistema | 99 |
| 56. | Cuadro de órdenes de mantenimiento | 103 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I. | Datos técnicos del precipitador..... | 22 |
| II. | Perfiles utilizados en el precipitador | 25 |
| III. | Lista de materiales estructura de los elementos eléctricos..... | 40 |
| IV. | Cargas actuantes sobre el precipitador..... | 59 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|---------------------------|---|
| Inox 316 | Acero inoxidable tipo 316 |
| H₂O | Agua |
| cm/s | Centímetros por segundo |
| DC | Corriente directa |
| ∅ | Diámetro |
| CO₂ | Dióxido de carbono |
| SO_x | Gases que contienen azufre y oxígeno |
| NO_x | Gases que contienen nitrógeno y oxígeno |
| Gr. A | Grado A |
| ° C | Grado Celsius |
| ° F | Grado Fahrenheit |
| gr/Nm³ | Gramos por metros cúbicos normales |
| KN | Kilonewton |
| kg/cm² | Kilogramo por centímetro cuadrado |
| kg/m³ | Kilogramo por metro cúbico |
| psig | Libra por pulgada cuadrada manométrica |
| MCR | Máxima carga continua |
| mgr/Nm³ | Miligramo por metro cúbico normal |
| MW | Megawatt |
| m | Metro |
| m² | Metros cuadrados |
| m³/s | Metros cúbicos por segundo |
| m/s | Metros por segundo |

| | |
|----------------------|-------------------------------|
| μm | Micrómetro |
| mmWc | Milímetros de columna de agua |
| CO | Monóxido de carbono |
| N₂ | Nitrógeno |
| W/W | Peso dividido peso |
| Plg | Pulgada |
| qq | Quintales |
| s | Segundos |
| Tons | Toneladas |
| TR | Transformador |
| N3 | Tres octavos de pulgada |
| TIG | Tungsteno inerte gas |
| N8 | Una pulgada |
| MC | Viga tipo C |
| MB | Viga tipo I |
| v/v | Volumen dividido volumen |

GLOSARIO

| | |
|---------------------|---|
| Abrasión | Desgaste causado al material por acción mecánica de algún flujo cargado con partículas. |
| Amortiguador | Dispositivo diseñado para absorber fuerzas y así tener control del movimiento. |
| ASTM | Es una organización internacional de desarrollo de normas conocido por sus siglas en ingles ASTM (<i>American Society for Testing and Materials</i>). |
| Atemperado | Elemento que forma parte de las calderas y su función es tener la temperatura del vapor saturado en los parámetros adecuados. |
| Bagazo | Residuo de materia que queda después de extraído el jugo de la caña de azúcar. |
| Biomasa | Materia orgánica heterogénea utilizable como fuente de energía, para aprovecharla en la transformación de materia prima en productos para consumo humano. |
| Biosfera | Sistema formado por el conjunto de los seres vivos del planeta tierra. |

| | |
|-------------------------------|---|
| Campo electromagnético | Campo físico, de tipo tensorial (entidad algebraica de varias componentes), producido por elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga eléctrica. |
| Capacidad portante | Capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. |
| Carbón mineral | Roca sedimentaria de color negro, con grandes cantidades de carbono y en cantidades menores otros elementos, utilizada como combustible. |
| Carga de ceniza | Carga ejercida a la estructura del precipitador electrostático que dependerá de las propiedades del combustible y de la carga de trabajo de la caldera. |
| Carga de viento | Presión del viento ejercida sobre la estructura, los factores de intensidad que influyen en la magnitud de carga son: velocidad de viento y variación de altura. |
| Cargas muertas | Carga vertical aplicada sobre la estructura que incluye el peso de la misma y todos los elementos permanentes. |
| Carga sísmica | Es la acción que un sismo produce sobre la estructura, se transmite a través del suelo. |

| | |
|-----------------------------|--|
| Cargas vivas | Carga externa móvil que actúa sobre la estructura, incluye el peso de la misma, personas y variación de material sobre las tolvas. |
| Clyde Bergemann | Fabricante de precipitadores electrostáticos, cuya sede se encuentra en India. |
| Corona de ionización | Fenómeno eléctrico que se produce en los conductores de las líneas sometidas a una alta tensión. |
| COV | Compuestos orgánicos volátiles, son todos los hidrocarburos que se encuentran en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal. |
| Difusión browniana | Proceso irreversible del movimiento aleatorio que se observa en algunas partículas microscópicas que se hallan en un medio fluido. |
| Eslinga | Material flexible y resistente, fabricada a partir de fibras textiles o de cables de acero comúnmente utilizada para elevaciones de grandes pesos. |
| ESP | Máquina que es utilizada para la captación de ceniza a través del campo electro-magnético y sus siglas significan precipitador electrostático (ESP). |

| | |
|-----------------------|--|
| Estequiometría | Reacción química en la que se observan modificaciones de las sustancias presentes, mide las proporciones cuantitativas o relaciones de masa. |
| Estrobos | Tramo corto de material flexible y resistente, en sus extremos tiene ojales debidamente preparados para sujetar y levantar cargas pesadas. |
| Fueloil núm. 6 | Fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada, la numeración tiene relación con su punto de ebullición, su composición y su uso. |
| FW | Alimentación de agua a través de una bomba, conocido por sus siglas en ingles FW (<i>Feeder Water</i>). |
| Gasoil | Conocido como gasóleo o diésel, es un hidrocarburo líquido compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado como combustible. |
| Hiperboloide | Figura simétrica generada por la rotación sobre su eje de las hipérbolas colocada equidistantemente, la función de esta pieza es evitar el arco eléctrico. |
| HRT | Nomenclatura que representa el tipo y la disposición de los tubos de una de las calderas pirotubulares. |

| | |
|---------------------|--|
| IMC | Es el índice de mantenimiento correctivo y representa el tiempo utilizado para la corrección del desperfecto del equipo. |
| IME | Abreviatura que indica el índice de emergencia, prioridad para resolver desperfectos y representa el porcentaje utilizado en tiempo. |
| IMP | Representa el porcentaje del tiempo programado que se utiliza para poder realizar los trabajos de mantenimiento preventivo. |
| IS | Símbolo que identifica, que el material es acero de la India, conocido por sus siglas en inglés IS (Indian Steel). |
| ISA | Símbolo que representa a los angulares que son de acero y fueron fabricados en la India, conocido por sus siglas en inglés ISA (<i>Indian Steel Angles</i>). |
| Lincoln 7018 | Electrodo básico, de muy bajo contenido en hidrógeno, utilizado en soldadura en general, buenas propiedades de impacto, todas las posiciones. |
| Micrómetro | Instrumento para medir con gran precisión cantidades lineales cuyo funcionamiento está basado en el tornillo micrométrico. |

| | |
|-----------------------|---|
| MTBF | Tiempo medio entre fallas, conocido por sus siglas en ingles MTBF (<i>Mean Time Between Fail</i>). |
| MTTR | Tiempo medio de reparación, conocido por sus siglas en ingles MTTR (<i>Mean Time to Repair</i>). |
| Niv. | Abreviatura que se utiliza para representar el nivel de los objeto respecto a un punto de referencia. |
| Nivel freático | Es la acumulación de agua subterránea, el nivel más alto que se encuentra a una profundidad relativamente pequeña bajo el nivel del suelo. |
| O.T. | Indicador que se utiliza en las plantas de proceso y representa la cantidad de órdenes de trabajos generadas a través del tiempo, esto con el objetivo de tener el control de los trabajos. |
| Poliuretano | Sustancia plástica que se emplea como aislante térmico, su molécula es de peso elevado, con una estructura compleja. |
| Relé | Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito. |
| Rustilo DWX 30 | Fluido anticorrosivo de baja viscosidad para protección temporaria. |

| | |
|----------------------------|---|
| SAP | Sistema informático basado en módulos que abarca todos los aspectos de la administración empresarial, conocido por sus siglas en inglés SAP (<i>Systems, Applications, Products</i>). |
| Sikagrout AD | Cemento de alto desempeño con aditivos adecuadamente dosificados, utilizado como nivelación de platinas y apoyos que trabajen a compresión. |
| Telehandler | Conocido en español como manipulador telescópico, es un vehículo con telescópica extensible, que puede ser equipado con varios dispositivos de elevación. |
| THK | Espesor del material, conocido por sus siglas en inglés THK (<i>Thickness</i>). |
| Turbogenerador | Máquina que mueve el generador eléctrico a través de turbo, por medio de vapor en condiciones ideales. |
| Viscosidad dinámica | Es la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad de un fluido en movimiento. |
| Voltaje | Es la magnitud física que, en un circuito, impulsa a los electrones a lo largo de un conductor, con mayor o menor potencia. |

RESUMEN

El Ingenio La Unión, empresa agroindustrial productora de azúcar y generación de energía eléctrica, se mantiene en constante crecimiento, por lo tanto, fue necesario el montaje de una caldera tipo acuotubular de un solo domo con una producción de 165 toneladas de vapor por hora que vendrá a cubrir la demanda de fábrica. Esta caldera podrá conectarse a los turbos de 22 MW o 26 MW, trabaja a una presión de 1500 psig, presión que se logra debido al diseño de la máquina. La tubería que conecta a las pantallas, cabezales y domo están conectadas por soldadura (no por expansión) para que soporte las presiones.

En la industria se cuenta con una gama de captadores de ceniza para controlar la emisión de contaminantes, en este trabajo de graduación se describen algunos, el uso dependerá del tipo de contaminante que se desee filtrar, el captador de ceniza instalado en la caldera No. 8 es el de precipitación electroestática. El precipitador electroestático (ESP) es un dispositivo que remueve partículas del gas que proviene del hogar de la caldera y fluye a través de los ductos, usando la fuerza de carga electroestática a través de un campo electromagnético emitido por un diferencial de potencial entre el electrodo emisor y las placas colectoras es como se logra la remoción, la eficiencia de este tipo de captador es del 99%.

El precipitador Clyde Bergemann India es de diseño alemán y sus parámetros de diseño varían según el tipo de combustible que se esté utilizando y las condiciones de temperatura de agua que alimenta a la caldera. La estructura se segmentó en cuatro áreas principales para una mejor

identificación: estructura base de descarga de ceniza, estructura del campo colector de ceniza, estructura del sistema de aislamiento eléctrico y estructura de los elementos eléctricos, cuenta también con equipos auxiliares.

Cumpliendo las condiciones indicadas por los ingenieros civiles en las bases del ESP, se procedió al montaje de las estructuras con el orden descrito en el párrafo anterior. Para cumplir con los objetivos, se utilizó el protocolo del montaje indicado por los fabricantes, para minimizar fallas posteriores en el equipo. Los equipos auxiliares fueron instalados por su área correspondiente (eléctrica e instrumentación).

Para cumplir con el objetivo de mantener en funcionamiento el equipo durante 24 horas por 6 meses, se propone la elaboración de un plan de mantenimiento preventivo, el cual deberá cumplir con la organización del plan. En el Ingenio se inició con la implementación de sistemas, aplicaciones y productos (SAP) para lograr un mejor control en los gastos, en este caso, los gastos que conlleva el funcionamiento del equipo.

Los indicadores que podrían implementarse para controlar el funcionamiento constante del ESP deberán ser los siguientes: disponibilidad, de gestión de órdenes de trabajo, proporción de tipo de mantenimiento. Estos proporcionarán información importante para tomar decisiones para el eficiente funcionamiento.

OBJETIVOS

General

Realizar la descripción del montaje de un lavador de gases, tipo electroestático, en la caldera No. 8 del Ingenio La Unión.

Específicos

1. Describir los componentes del lavador electroestático.
2. Describir el montaje del lavador electroestático.
3. Describir la forma mecánica de operación del sistema electroestático.
4. Proponer guías para un control de los indicadores de mantenimiento.
5. Identificar los puntos críticos del precipitador en proceso y en reparación.

INTRODUCCIÓN

En la industria azucarera se utiliza maquinaria que aprovecha el poder calorífico del bagazo de caña para producir energía, parte de la reacción de esta combustión desprende material nocivo (gases hollín). Por responsabilidad al medio ambiente, el Ingenio La Unión estudia e implementa nueva tecnología con el fin de mejorar el nivel productivo y disminuir la contaminación. Se ha visto la necesidad de ampliar y mejorar el proceso y, por ende, el Ingenio requiere la implementación de equipos más eficientes.

En este trabajo se llevará a cabo una descripción del equipo, montaje y controles de mantenimiento del lavador electrostático, se dará énfasis en el control de mantenimiento en tiempo de zafra y en reparación.

Se pretende que el trabajo sea tomado como una guía de montaje y control de mantenimiento del lavado electrostático, con los datos estadísticos y estudios realizados a otros equipos captadores de ceniza. En el Ingenio La Unión se decidió montar el precipitador electrostático, con el fin de disminuir los niveles de contaminación de los gases de chimenea.

Con el ánimo de contribuir con el Ingenio y la responsabilidad hacia las comunidades, país y el mundo a través del cumplimiento de las normas, el trabajo de graduación tiene por objetivo realizar la descripción del montaje del lavador electrostático, equipo que disminuye en un mayor porcentaje los gases contaminantes que dicho proceso genera. Además, al implementar el nuevo sistema se estaría descartando la utilización del agua que es usada en otros tipos de lavadores.

1. GENERALIDADES

1.1. Descripción del Ingenio La Unión

A continuación se presenta una breve descripción de la ubicación y proceso de la empresa agroindustrial, dando un enfoque específicamente al área de cogeneración y generación.

1.1.1. Ubicación geográfica

En el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa del departamento de Escuintla, se encuentra el Ingenio La Unión, S.A. ubicado en la finca Belén.

Tiene como colindancias al norte la finca Cañaverales del Sur, al noroeste colinda con las fincas Santa Isabel y San Felipe, al este, las fincas San Ignacio y El Brillante, el caserío Las Morenas y el río Petayá. Al sur colinda con las fincas Tesalia y Venecia, al oeste con la finca Limones y el río Cristóbal.

1.1.1.1. Coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas de las instalaciones del Ingenio son: latitud norte 14 grados 16 minutos 11 segundos, longitud oeste 91 grados 05 minutos 05 segundos y una altitud de 280 m sobre el nivel de mar.

1.1.1.2. Clima

El clima de la región es cálido, registrándose temperaturas de 14,2 °C (mínima) y 36,7 °C (máxima). Se observa una precipitación pluvial abundante durante los meses de mayo a octubre, mientras que en los meses de noviembre a abril se considera una época seca.

1.1.2. Proceso

Ingenio La Unión S.A. es una empresa que se dedica a la transformación de materia prima vegetal en productos de primera necesidad. La materia prima utilizada es la caña de azúcar, empezando desde su cultivo hasta su cosecha, pasando por un proceso de transformación con la extracción de su jugo hasta la cristalización de los granos de azúcar. El proceso de transformación fue diseñado para utilizarlo de la mejor manera y así extraerle al máximo el jugo a la caña. Pero, diariamente hay mejoras en la tecnología de esta industria, por lo tanto siempre habrá cambios que se adaptarán para ser utilizados de una manera óptima.

Al extraerle el jugo a la caña, al residuo (bagazo) se le controla la humedad, es decir, se le dosifica la cantidad de agua necesaria en el último molino. Por lo tanto, este bagazo se encontrará en condiciones para ser utilizado como combustible en las calderas, para la obtención de vapor que es usado para la cristalización del azúcar y generación de energía eléctrica por medio de los turbogeneradores. Esta energía es autosuficiente para el funcionamiento de todos los equipos de fábrica que son utilizados en el proceso y el exceso es enviada a la red nacional para su venta.

1.1.3. Cogeneración

Ingenio La Unión cosechó en la zafra 2013-2014 una producción de azúcar de 5800100qq. De esta producción la empresa fabrica diferentes tipos de azúcar: azúcar crudo mundial, azúcar blanco estándar con vitamina y sin vitamina, azúcar crudo especial, azúcar blanco cristal o superior y azúcar refinada que inició en el 2012.

Cuando se habla de cogeneración se refiere al vapor que deben suministrar las calderas, vapor que se utiliza para la cristalización del jugo de caña y así sacar los productos mencionados anteriormente. A este vapor se le denomina vapor de escape, el vapor es conducido de las calderas hacia la turbina para mover el generador, el vapor que sale de la turbina a baja presión es al que se le llama vapor de escape que a su vez es conducido hacia fábrica.

Para suministrar la demanda de la fábrica el Ingenio cuenta con 6 turbogeneradores de escape, los cuales generan energía eléctrica y vapor para el proceso. El vapor se produce con 7 calderas de tipo acuotubular que únicamente queman bagazo, cuyas producciones y presiones están de acuerdo a las necesidades de consumo, tanto para la generación como para el proceso.

Los turbogeneradores utilizados en la cogeneración de energía eléctrica del Ingenio presentan las siguientes características:

- 2 MW, 200 psig, 620 °F, 20 psig de contrapresión, 1800 rpm, 480 volts, 3 fases.
- 5 MW, 400 psig, 620 °F, 20 psig de contrapresión, 3600 rpm, 2400 volts, 3 fases.

- 7,5 MW, 600 psig, 750 °F, 20 psig de contrapresión, 3600 rpm, 4800 volts, 3 fases.
- 10 MW, 600 psig, 750 °F, 20 psig de contrapresión, 3600 rpm, 13800 volts, 3 fases.
- 20 MW, 600 psig, 750 °F, 20 psig de contrapresión, 6000 rpm, 13800 volts, 3 fases.
- 22 MW, 900 psigo 600psig, 20 psig de contrapresión.
- 26 MW, 900 psig ciclo cerrado por condensación.

1.1.4. Generación

La planta generadora suministra a la red nacional 26 MW con vapor a 900psigy 900 °F. Esta planta generadora consiste en: caldera, turbogenerador, condensando, torre de enfriamiento y auxiliares, equipo que fue instalado para trabajar independiente del Ingenio. La caldera está diseñada para quemar *fuel oil* No. 6 y bagazo al 100%.

1.1.5. Proyecto nuevo

En el2013, el Ingenio La Unión inició el proyecto del montaje de la caldera No. 8 y turbogenerador No. 7. Debido al crecimiento que ha tenido el área de extracción y fabricación en los últimos años, en ocasiones se dificulta cubrir la demanda de vapor, el vapor que se producirá en la caldera 8 vendrá a suministrar a la fábrica.

La caldera tiene la capacidad de quemar carbón mineral y bagazo al 100%, con una producción de vapor de 165 toneladas por hora a una presión de 1500 psig y 1004 °F. Cuenta únicamente con un domo, lo cual la hace más

eficiente, y un sistema de captación de ceniza en seco para evitar daño al medio ambiente.

1.2. Calderas

El término caldera se aplica a un dispositivo para generar vapor para fuerza, procesos industriales, calefacción o para uso general. En términos generales, a la caldera se le considera como un conjunto de elementos mecánicos que produce vapor en condiciones controladas. Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de la combustión de algún combustible a un fluido (agua) contenido dentro de la caldera.

El vapor o agua caliente debe ser alimentado en las condiciones deseadas, es decir, de acuerdo con la presión, temperatura, calidad y en la cantidad que se requiera. Por razones de economía, el calor debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas.

1.2.1. Tipos de calderas

Las calderas están diseñadas con superficies que transmitirán el calor por medio del contacto de tubos (agua, fuego, fuego agua). El agua circulará a través del sistema y será retroalimentado según el uso. Los separadores de agua vapor son de importancia debido a que este elemento dividirá las masas, en este punto es donde se separa el vapor saturado y el agua.

Las calderas para producción de vapor, por el contenido de los tubos, se clasifican en:

- Calderas pirotubulares

- Calderas acuotubulares

1.2.1.1. Calderas pirotubulares

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

1.2.1.2. Calderas acuotubulares

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

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

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

Existen otras clasificaciones de la calderas según su uso, presión, materiales de construcción, tamaño, sistemas del fogón, fuente de calor, clase de combustible, sistema de circulación, posición del hogar, y otras.

1.2.1.3. Calderas de un solo domo

Estas calderas están diseñadas para trabajar a presión alta, una de las características importantes es que todos sus elementos están unidos a través de soldadura de alta calidad, soldadura TIG. La circulación del agua es natural, únicamente se necesita de la bomba para introducir el agua al circuito debido al consumo o requerimiento de operación. La bomba inyecta agua al economizador para que esta sea calentada antes de ser introducida al domo a una temperatura muy cercana a la de saturación; del domo es irrigada hacia las paredes de agua hasta la parte más baja. El agua es calentada y, por efecto natural, los gases suben y son separados en el domo, este vapor saturado es dirigido hacia los serpentines del sobrecalentador. Al momento de salir del sobrecalentador el vapor es llamado vapor sobrecalentado, luego, la temperatura es controlada en los atemperados para ser utilizada en el turbo según los requerimientos del diseñador.

1.3. Chimeneas

Son conductos construidos para dar salida a la atmósfera libre a gases que resultan de la combustión. Estos gases son el resultado de la reacción

química de aire, calor y combustible. Su diseño dependerá de las normas y legislación de cada país y las variables más importantes a tomar en cuenta son:

- Sección transversal
- Altura
- Tipo de material estructural
- Cimentación

1.3.1. Gases de combustión

Los humos son producto de la combustión de combustibles fósiles (carbón, derivados líquidos o gaseosos del petróleo), madera, bagazo, entre otros. En el caso frecuente de combustibles líquidos (*fuel - oil*, carbón, *gasoil*) o gaseosos (hidrocarburos gaseosos o gas natural), estos humos se componen de:

- N_2 : procedente del aire comburente.
- CO_2 y H_2O (vapor): procedentes de la combustión de los combustibles orgánicos, junto con pequeñas cantidades proveniente de la propia composición del aire comburente.
- O_2 : procedente del aire comburente, en exceso respecto al necesario para una combustión estequiométrica.
- NO_x : si la temperatura alcanzada por la llama supera los $1300\text{ }^\circ\text{C}$ en alguna zona, la combinación del nitrógeno del aire (o de los compuestos nitrogenados presentes en el combustible) con el oxígeno se realiza a velocidades apreciables, contaminando los humos con óxidos de

nitrógeno en proporciones suficientes como para sobrepasar las normativas de ciertos países.

- SO_x : algunos combustibles, especialmente los líquidos, contienen azufre en proporciones que pueden variar entre menos de un 1% (combustible BTS) hasta algo más de un 5% (fueles pesados), que combinado con el oxígeno del aire, da lugar a diferentes compuesto de azufre. Todos ellos considerados como contaminantes por las administraciones de diferentes países.
- CO: resultado de una combustión incompleta.
- Radicales libres: partículas sólidas (fundamentalmente de carbono) y otras, procedentes de impurezas en el combustible (metales pesados, por ejemplo), aunque todos ellos en muy pequeñas proporciones.

1.3.2. Ceniza

Es el producto de la combustión de algún material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles, como sales minerales. Parte queda como residuo en forma de polvo depositado en el lugar donde se ha quemado el combustible(madera, bagazo, entre otros) y parte puede ser expulsada al aire como parte del humo.

1.3.3. Hollín

Son partículas sólidas de tamaño muy pequeño, en su mayoría compuestas de carbono impuro, pulverizado, y generalmente de color negro

resultante de la combustión incompleta de un material (madera, bagazo, entre otros). Su aspecto es similar a la ceniza pero con un tono más negro.

1.4. Contaminación del aire

Es una mezcla de partículas sólidas y gases en el aire. Las emisiones de las fábricas producto de la combustión pueden estar suspendidas como partículas.

Algunos contaminantes del aire son tóxicos. Su inhalación puede aumentar las posibilidades de tener problemas de salud. Las personas con enfermedades del corazón o pulmón, los adultos de más edad y los niños tienen mayor riesgo de tener problemas por la contaminación del aire.

Aunque la contaminación no es ninguna novedad en la historia de la Tierra, ni es exclusivamente producida por el hombre, solo ahora y por culpa de nuestra especie se ha llegado a poner en peligro la biosfera. Esta situación se relaciona con procesos tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo industrial y la urbanización. Esos tres procesos presentan una evolución explosiva y se encuentran íntimamente vinculado entre sí.

1.5. Lavadores de gases

Algunas técnicas para controlar la emisión de contaminantes del aire no requieren equipo adicional, mientras que otras requieren control "agregado". El control agregado es aquel que se añade a los procesos que generan contaminación con la finalidad de destruir o capturar los contaminantes. La técnica elegida para controlar la emisión de contaminantes en una determinada

fuente depende de muchos factores; el más importante es si el contaminante es un gas o una partícula.

Existen contaminantes en estado gaseoso, líquido y sólido. Los contaminantes en estado gaseoso incluyen a los óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles (COV). Muchos contaminantes peligrosos son gases. Los contaminantes en estado líquido y sólido, llamados material particulado, incluyen el polvo de cemento, humo, cenizas volantes y vapores de metales.

Los gases emitidos por calderas que utilizan bagazo de caña y otros tipos de biomasa similares deben, obligatoriamente, pasar por una etapa de lavado eficiente para remoción de las partículas sólidas que son arrastradas.

El material particulado incluye pequeñas partículas líquidas y sólidas, también es referido como humo, polvo, vapor o neblina. Las partículas con menos de 10 y 2,5 micrómetros de diámetro son reconocidas como contaminantes criterio. Estas pequeñas partículas tienen un efecto mucho mayor sobre la salud humana que las partículas más grandes.

Las técnicas de control para las partículas se centran en capturar las partículas emitidas por una fuente contaminante. Antes de elegir un dispositivo de control de partículas se deben considerar muchos factores. Usualmente, las partículas son recogidas y encauzadas por un canal o chimenea. Las características de la corriente de partículas afectan la elección del dispositivo de control. Estas características incluyen la variedad del tamaño de las partículas en la corriente de escape, la tasa de flujo del escape, temperatura, contenido de humedad y propiedades químicas del flujo de la corriente de escape, como capacidad explosiva, acidez, alcalinidad e inflamabilidad.

Los dispositivos de control más usados para controlar la emisión de partículas son:

- Filtros
- Lavadores venturi
- Cámaras de sedimentación
- Ciclones
- Precipitadores electroestáticos

En muchos casos, se usa más de uno de estos dispositivos en serie para obtener la eficiencia deseada de remoción.

1.5.1. Filtros

El lavador de gases tipo filtro trabaja bajo el mismo principio que una aspiradora de uso doméstico. El flujo de gas pasa por el material del filtro que retira las partículas. El filtro de tela es eficiente para retener partículas finas y puede sobrepasar 99 % de remoción en la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo los gases que puede filtrar están dentro de un rango de temperatura baja, debido a que las altas temperaturas dañarían muy rápidamente el medio filtrante.

1.5.2. Lavadores Venturi

Los lavadores de gas tipo Venturi son empleados extensamente en aplicaciones donde se requiere la captura de partículas submicrónicas, así como de altas eficiencias de colección. El diseño vertical permite que el agua se distribuya de manera uniforme sin que se aglomere el material colectado y elimina los problemas de abrasión. Los lodos pueden concentrarse hasta en un

10% en peso con el empleo de una bomba de recirculación. De este modo, la cantidad de agua a filtrar es menor.

Los gases que entran en el lavador son dirigidos hacia un venturi inundado con líquido a través de un ducto seco, mientras que el líquido es introducido en una cámara de distribución cubierta. Como resultado, no existe interferencia fase húmedo/seco, la cual podría provocar la aglomeración del polvo. El ducto de entrada ayuda a direccionar los gases a la garganta del venturi que se encuentra completamente inundada y el líquido actúa como una capa protectora que elimina el choque térmico y minimiza la abrasión debida a las partículas de polvo.

A medida que el líquido desciende por la garganta debido a su propio peso, la alta velocidad del gas fragmenta el líquido creando una densa niebla de gotas muy finas. La niebla captura las partículas a través del impacto, intercepción o difusión browniana. Los gases y la niebla generada entran en una cámara de separación donde el polvo adherido a las gotas de agua es separado del gas y se escurre hasta la parte inferior del tanque. El gas limpio sale del lavador hacia un ventilador o chimenea. Sin embargo, una desventaja de este dispositivo es la producción de aguas residuales.

Figura 1. **Lavador Venturi**



Fuente: CASTRO, Silva. *Tecnologías de mitigación de emisiones en centrales termoeléctricas a carbón*. <http://web.ing.puc.cl/power/>. Consulta: 22 de enero de 2014.

1.5.3. Cámaras de sedimentación

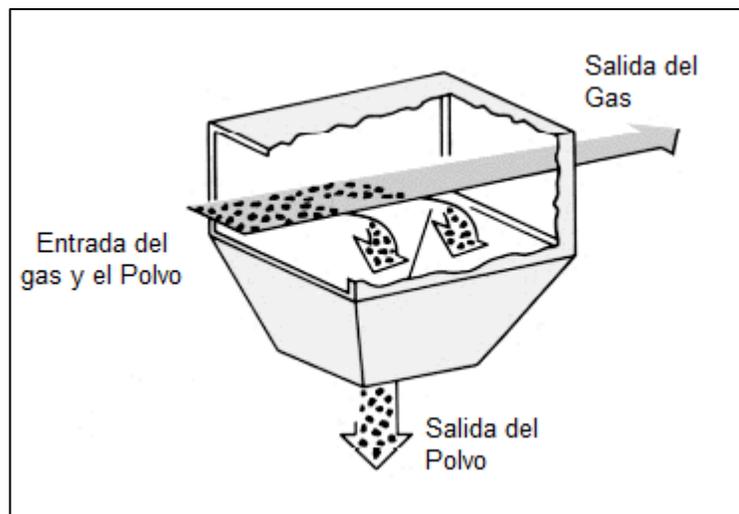
Emplean la fuerza de la gravedad para separar las partículas más gruesas. El gas residual entra en una cámara que disminuye su velocidad, pudiendo sedimentar las partículas más gruesas y densas en una tolva de recolección. Se usan usualmente como tratamiento previo a otros para eliminar la fracción más gruesa del material en suspensión. Son utilizados para la captura de partículas de diámetro mayor de 10 μm , aunque solo atrapan de manera efectiva a partículas de más de 50 μm .

Las ventajas de estos equipos radican en los bajos costos de mantenimiento y de operación, la baja velocidad del gas no produce abrasión y muy pocas limitaciones en temperatura de operación y carga residual del

efluente. En contra, son equipos de un volumen considerable, no pueden manejar materiales pegajosos, y la baja eficiencia que presentan para partículas medianas y pequeñas.

El diseño de estos equipos es muy sencillo, se debe evaluar la velocidad de las partículas en su caída con respecto a la velocidad del gas, de manera que si las partículas tienen tiempo para sedimentar, es decir, recorrer la altura hasta la tolva de recolección, en la longitud de la cámara, entonces la partícula quedará atrapada. En caso contrario, la partícula será arrastrada por la corriente gaseosa.

Figura 2. **Cámara de sedimentación**



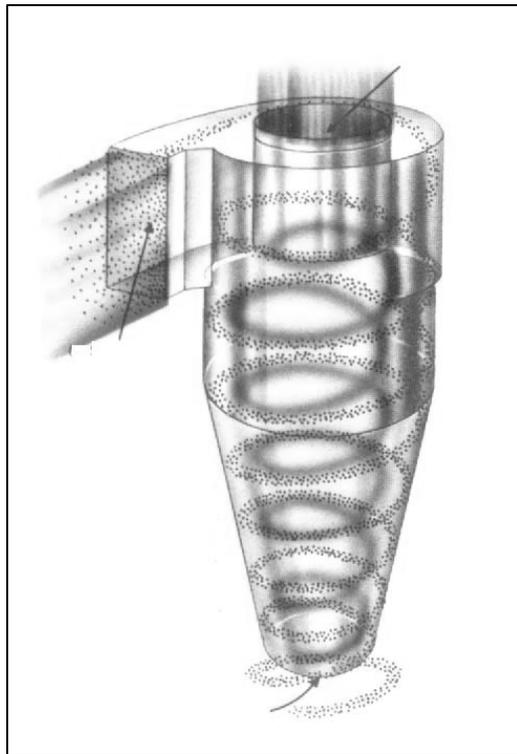
Fuente: CASTRO, Silva. *Pontificia Universidad Católica de Chile*. <http://web.ing.puc.cl/power/>.

Consulta: 30 de enero de 2014.

1.5.4. Ciclón

Usan el principio de la fuerza centrífuga para remover el material particulado. En un ciclón, el flujo contaminante es forzado a un movimiento circular. Este movimiento ejerce fuerza centrífuga sobre las partículas y las dirige a las paredes exteriores del ciclón. Las paredes del ciclón se angostan en la parte inferior de la unidad, lo que permite que las partículas sean recolectadas en una tolva. El aire limpio sale del ciclón por la parte superior de la cámara, pasando por un espiral de flujo ascendente o vórtice formado por una espiral que se mueve hacia abajo.

Figura 3. Lavador ciclón



Fuente: CASTRO, Silva. *Pontificia Universidad Católica de Chile*. <http://web.ing.puc.cl/power/>.

Consulta: 3 de febrero de 2014.

1.5.5. Precipitadores electrostáticos

Son dispositivos que se utilizan para atrapar partículas a través de la ionización de las mismas. Se emplean para reducir la contaminación atmosférica producida por humos y otros desechos industriales gaseosos, especialmente en las plantas que funcionan en base a combustibles derivados del petróleo.

Un precipitador electrostático (ESP, por sus siglas en inglés) o un filtro de aire electrostático es un dispositivo que remueve partículas de un gas que fluye (como el aire) usando la fuerza de una carga electrostática inducida.

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos de filtración altamente eficientes, pueden remover fácilmente finas partículas como polvo y humo de la corriente de aire.

El precipitador de placas y electrodos, en términos generales, contiene una fila de tubos (electrodos con puntas de cobre transversales), seguido por filas de placas planas de metal espaciadas. La corriente de aire pasa a través de los espacios entre los electrodos y el apilado de placas. Una fuente de alto voltaje transfiere electrones de las placas hacia los electrodos, desarrollando así una carga negativa de varios miles de voltios en los electrodos, relativa a la carga positiva de las placas. Mientras que el gas de combustión cargado de partículas atraviesa la fuerte carga negativa de los electrodos, la materia de partículas toma la carga negativa y se ioniza. Las partículas ionizadas entonces pasan a través de las placas cargadas positivamente, siendo atraídas por estas placas.

Una vez que las partículas están en contacto con la placa positiva, entonces ceden sus electrones y se convierten en partículas cargadas positivamente como la placa, y comienzan a actuar así como parte del colector. Debido a este mecanismo, los precipitadores electrostáticos pueden tolerar grandes cantidades de acumulación de residuo en las placas de recolección y seguir funcionando eficientemente, puesto que la materia por sí misma ayuda a recolectar más materia de la corriente de aire. La precipitación electrostática es típicamente un proceso seco.

1.6. Descripción del problema

En el Ingenio La Unión, S.A., debido al crecimiento en la producción de azúcar, específicamente de azúcar refino, fue necesaria la instalación de otra caldera que suministrara vapor. Con la instalación de la nueva caldera, se tomó en cuenta la contaminación que dicha maquinaria generará al ambiente, debido a la utilización de combustibles derivados del petróleo y biomasa.

En la caldera No.6, se cuenta con un sistema de separación de ceniza tipo húmedo (*scrubber*), el cual opera de la siguiente manera: el flujo de aire es direccionado a la parte baja del *scrubber* y en la parte media del sistema se atomiza agua para que esta choque con los gases y así captar la mayor parte de partículas. El agua con material contaminante es bombeada hacia los decantadores y se le dosifica un porcentaje de floculante, porcentaje que es calculado en el laboratorio de química que varía según la cantidad de contaminación que arrastre el agua. Este floculante tiene como función separar la ceniza del agua por medio de la precipitación de la ceniza en los decantadores. El lodo de ceniza es bombeado para ser compactado y así poder ser transportado lo menos húmedo posible hacia los campos de producción de caña.

El proceso de separación de ceniza representa un elevado costo para la empresa. El costo se eleva debido a la utilización de químicos y agua que se tiene que utilizar para mantener los niveles adecuados en el circuito. La cantidad de agua utilizada para mantener los niveles dependerá de la eficiencia del tratamiento de agua de ceniza del lavado de gases. Según datos históricos la eficiencia del sistema es variable y esto conlleva a la introducción de un nuevo equipo.

Con el objetivo de disminuir al máximo los niveles de contaminación y bajar los costos de operación, en esta nueva caldera se ha decidido instalar un sistema de separación de ceniza tipo seco (precipitador electrostático, ESP). El montaje de este equipo vendrá a beneficiar la operación de separación de ceniza.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS COMPONENTES DEL PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO

El precipitador electroestático es de diseño alemán fabricado en la India por la Clyde Bergemann India. La función de la máquina es captar ceniza que viene de los gases derivados de la combustión dentro del horno de la caldera acuotubular, está diseñado para que pueda cumplir con su función dentro de los parámetros de la caldera a la cual está anclado por medio de ductos que conducen el material nocivo.

La manera de capturar el material particulado es por medio de la generación de un campo electromagnético. Este carga negativamente las partículas que van en los gases por medio de los electrodos emisores que están con una alta carga de voltaje en corriente directa, formando una corona de ionización que genera electrones que se pegan a las partículas cargándolas negativamente, posteriormente se atrapan en la superficie positiva en las placas colectoras que están conectadas a un diferencial positivo y, para terminar con el ciclo, estas placas y electrodos emisores son sacudidos por medio de unos martillos eléctricos, depositando la ceniza en las tolvas para su posterior conducción.

El volumen del precipitador, es decir, cantidad de campos colectores, área de recolección de ceniza y número de electrodos emisores, dependerá de las características del gas. El precipitador que se instaló en la caldera No.8 del Ingenio la Unión cumple con los requerimientos necesarios para lograr un trabajo eficiente. En la tabla I se muestran los datos técnicos importantes del precipitador.

Tabla I. Datos técnicos del precipitador

| No. | DATOS DE DISEÑO PARÁMETROS DE DISEÑO | TIPO DE COMBUSTIBLE | | | |
|-----|--|--|---|--------------------|--|
| | | DISEÑO ESP (110% MC CON BAGAZO) (FW @ 40°C) | DISEÑO ESP (100% MC BAGAZO CON CARBON) (FW @ 40°C) | 100 % MC CARBON | 100 % MC BAGAZO (FW @ 204 °C) |
| 1 | VOLUMEN DEL GAS EN m ³ /s | 146,6 | 425,9 | 75,25 | 113,59 |
| 2 | TEMPERATURA DE OPERACIÓN °C | 160 | 150 | 140 | 150 |
| 3 | TIPO DE CENIZA | CENIZA ABRASIVA | | | |
| 4 | CARGA MAXIMA DE POLVO EN LA ENTRADA gr/Nm ³ | 6 | | | |
| 5,1 | EMISION DE SALIDA mgr/Nm ³ | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 5,2 | UN CAMPO APAGADO mgr/Nm ³ | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 6 | HUMEDAD EN COMBUSTIBLE % v/v | 50,73 | 12 | 50,73 | 12 |
| 7 | CO EN GASES DE COMBUSTION % W/W | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | AREA DE RECOLECCIÓN DE CENIZA m ² | 9083,7 | | | |
| 9 | AREA DE RECOLECCIÓN DE CENIZA ESPECIFICA m ² /m ³ /s | 61,96 | 72,15 | 120,71 | 79,97 |
| 10 | No. DE PAOS DE GASES EN CADA CAMPO | 28 | | | |
| 11 | VELOCIDAD A TRAVES DEL PRECIPITADOR m/s | 1,17 | 1,01 | 0,6 | 0,91 |
| 12 | TIEMPO DE TRATAMIENTO EN SEGUNDOS | 12,6 | 14,7 | 24,5 | 16,2 |
| 13 | No. DE CAMPOS EN SERIE POR FLUJO | 4 MECÁNICOS Y 4 ELÉCTRICOS | | | |
| 14 | VELOCIDAD DE MIGRACIÓN cm/s | 7,72 | 6,63 | 3,96 | 5,99 |
| 15 | PRESION DE DISEÑO mmWC | ± 400 | | | |
| 16 | TEMPERATURA DE DISEÑO °C | 250 °C | | | |
| 17 | DESNSIDAD DE LA CENIZA KG / M ³ | 1100 | | | |
| 18 | DENSIDAD DE CENIZA PARA DESCARGA KG/M ³ | 150 | 600 | 150 | 600 |
| 19 | CAIDA DE PRESIÓN DE JUNTA A JUNTA mmWC | 25 | | | |
| 20 | VELOCIDAD DEL VIENTO PARA DISEÑO m/s | 45 | | | |
| 21 | ZONA SISMICA | ZONA 4 SEGÚN CODIGO UBC 1997 | | | |
| 22 | CANTIDAD DE CENIZA RECOLECTADA EN TODOS LOS CAMPOS EN TONELADAS | 1,32 | 0,401 | 0,121 | 0,037 |

Fuente: Clyde Bergemann. *Plano general No. D2.*

El precipitador cuenta con cuatro campos, el primer campo atrapa un 70% de ceniza, el segundo campo un 18%, el tercer campo un 10%, el cuarto campo un 1% y un 1% de ceniza se escapará a la atmósfera. Sin embargo, se puede dar el caso que el cuarto campo ya no sea necesario utilizarlo, debido a la buena eficiencia de los primeros tres campos. Esto significa que existirá una variación de los porcentajes de captación en cada campo, según sea el comportamiento de las variables que influyen en la eficiencia. La eficiencia dependerá de: intensidad del campo electromagnético, radio de la partícula, permitividad eléctrica del material, viscosidad dinámica y velocidad de migración de la partícula. Por lo tanto, se puede definir la eficiencia del precipitador como:

$$N = [1 - e (-A / V) x W] . 100$$

Donde

A: superficie colectora efectiva del precipitador, en metros cuadrados

V: flujo de gas a través del precipitador, en metros cúbicos por segundo

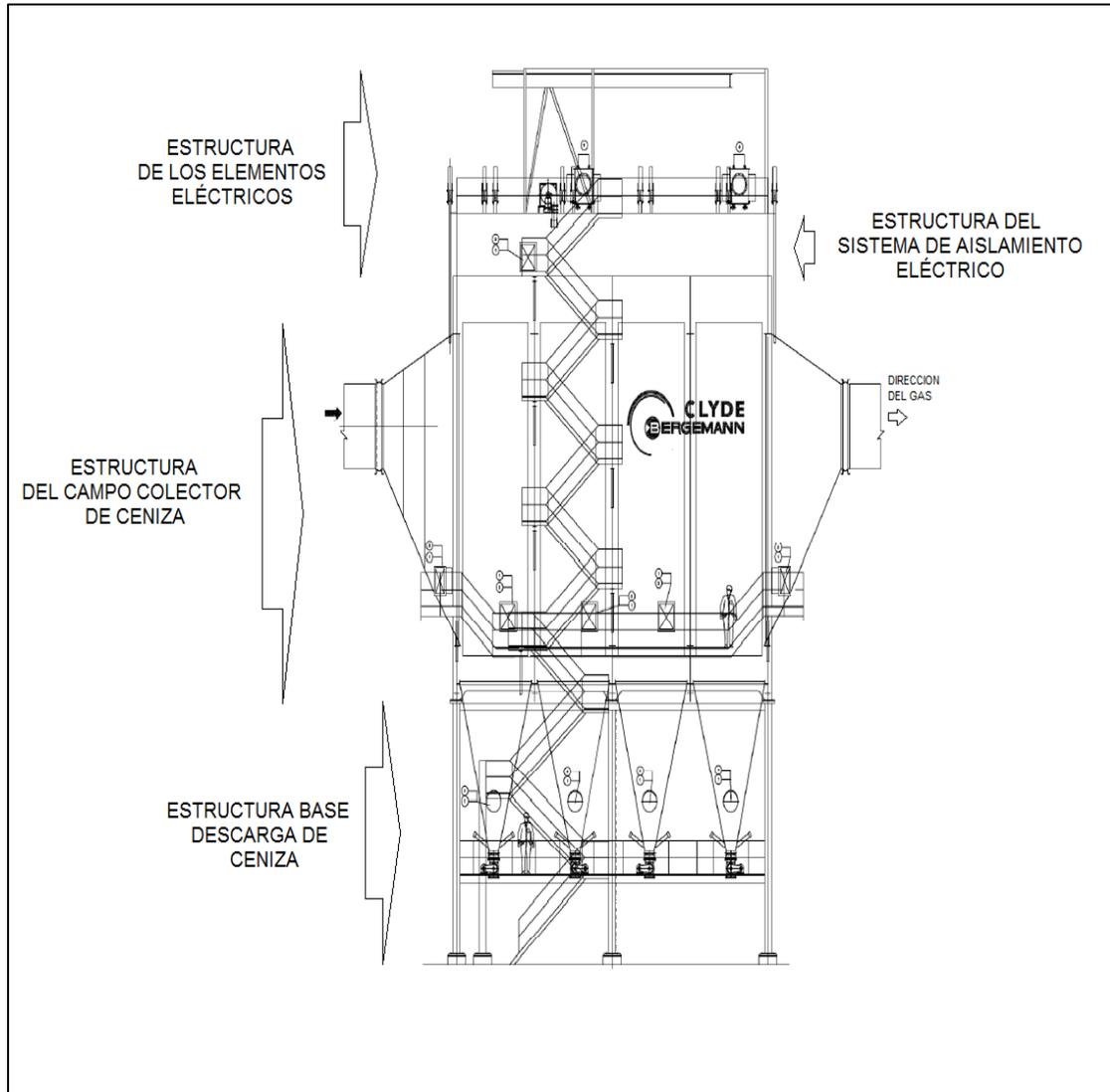
e: base del logaritmo natural = 2,718

W: velocidad de migración, en metros por segundo

2.1. Estructura

El precipitador electroestático, en el área mecánica, está compuesto por cuatro segmentos principales: estructura base descarga de ceniza, estructura del campo colector de ceniza, estructura del sistema de aislamiento eléctrico y estructura de los elementos eléctricos del sistema (ver figura 4).

Figura 4. Precipitador electrostático



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*.p.111.

Tabla II. **Perfiles utilizados en el precipitador**

| SECCIONES DE VIGAS Y REFUERZOS | | |
|--------------------------------|-------------|---|
| TIPO | SECCIÓN | |
| (1) | MC 100 |  |
| (2) | MC 150 |  |
| (3) | MC 200 |  |
| (4) | MC 250 |  |
| (5) | MB 200 |  |
| (6) | MB 250 |  |
| (7) | MC 150 CAJA |  |
| (8) | MC 200 CAJA |  |
| (9) | MC 250 CAJA |  |
| (10) | 75x75x8 |  |
| (11) | 75x75x6 |  |
| (12) | MC 125 |  |

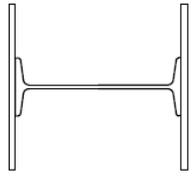
Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 12 1/7.*

2.1.1. Estructura base

La estructura base está compuesta principalmente por diez columnas ISMB 400, (ver figura 5,6 y 7).Esta tiene un largo total con bases en los extremos de 7,61 m, en el extremo inferior tiene una base de 70 cm x 70 cm y un grosor de 40mm, conteniendo seis orificios por los cuales entrarán los pernos de anclaje. Los pernos de anclaje tienen las siguientes características: diámetro de 36mm, largo de 98mm, tuerca y contratuerca M 26, todos los componentes descritos anteriormente son de material IS 2062 Gr. A.

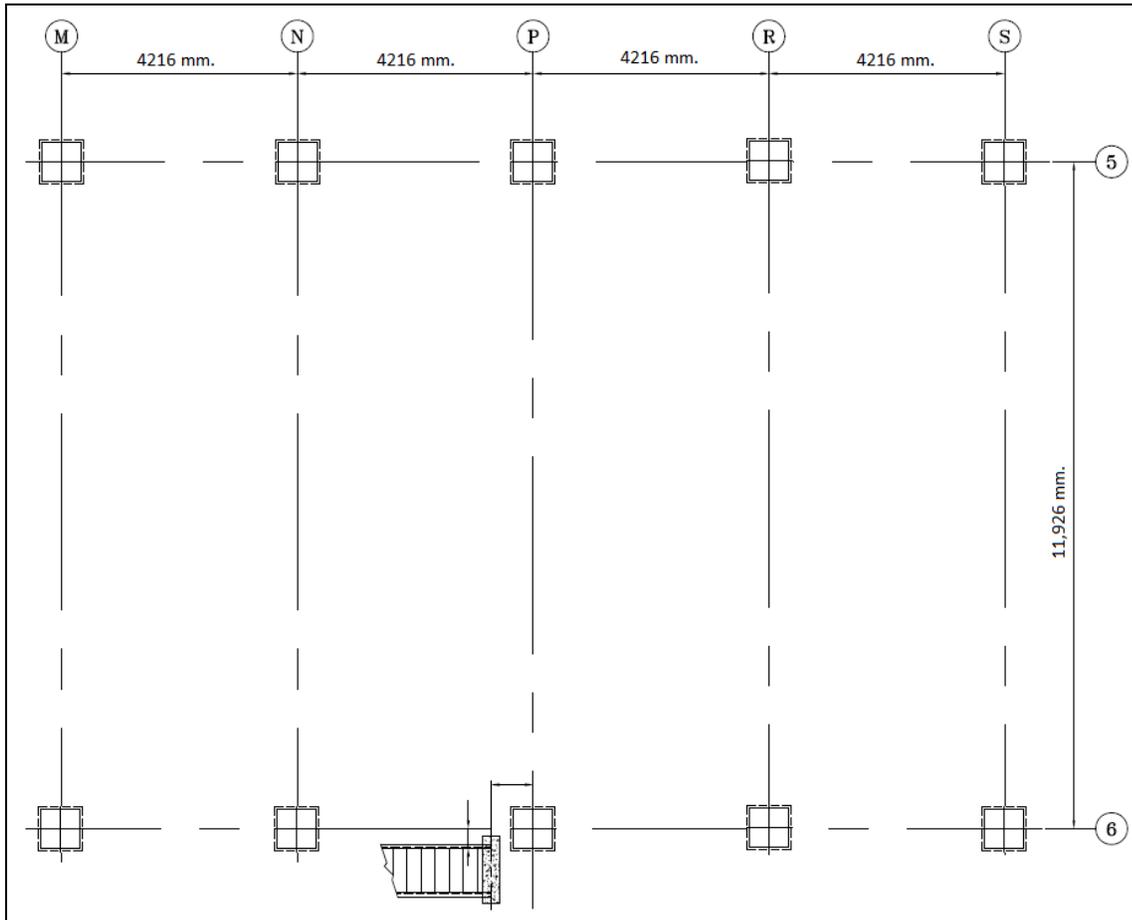
En la parte baja de la base en el centro tiene un segmento de columna ISMB 250 con un largo de 150mm con forma de X en su corte transversal. Por estudios realizados al suelo es necesario la colocación de este segmento para que la estructura esté preparada para soportar movimientos sísmicos. Para unir y darle firmeza a la columna, tiene cuatro carcavones arriba de la platina base, uno en cada lado de la columna. En el extremo superior tiene una tapadera de 45 cm x 51 cm y un grosor de 40mm con cuatro orificios, los cuales son utilizados para anclar provisionalmente las siguientes columnas que pertenecen al campo colector de ceniza.

Figura 5. **Sección transversal columna principal**

| SECCIONES DE LAS COLUMNAS PRINCIPALES ESP | |
|--|---|
| M-5 N-5 P-5 R-5 S-5 M-6 N-6 P-6 R-6 S-6 |  <p>ISMB 400 16 mm. ESPESOR</p> |

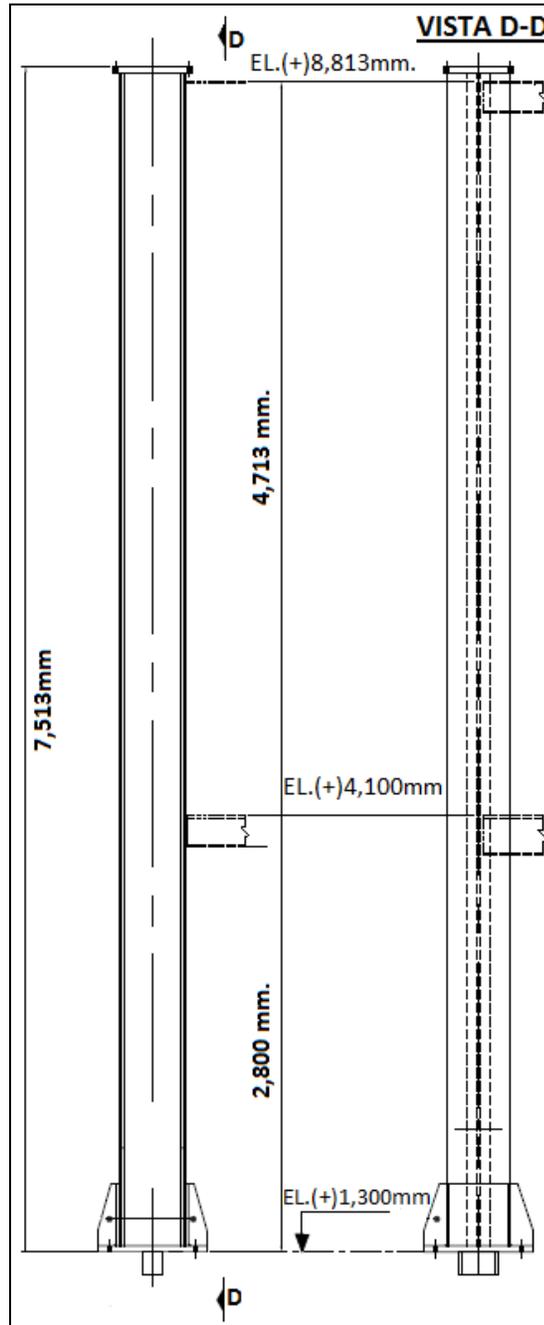
Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 12 1/7.*

Figura 6. Vista de planta columnas principales



Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 12 1/7.*

Figura 7. Columna principal vista lateral

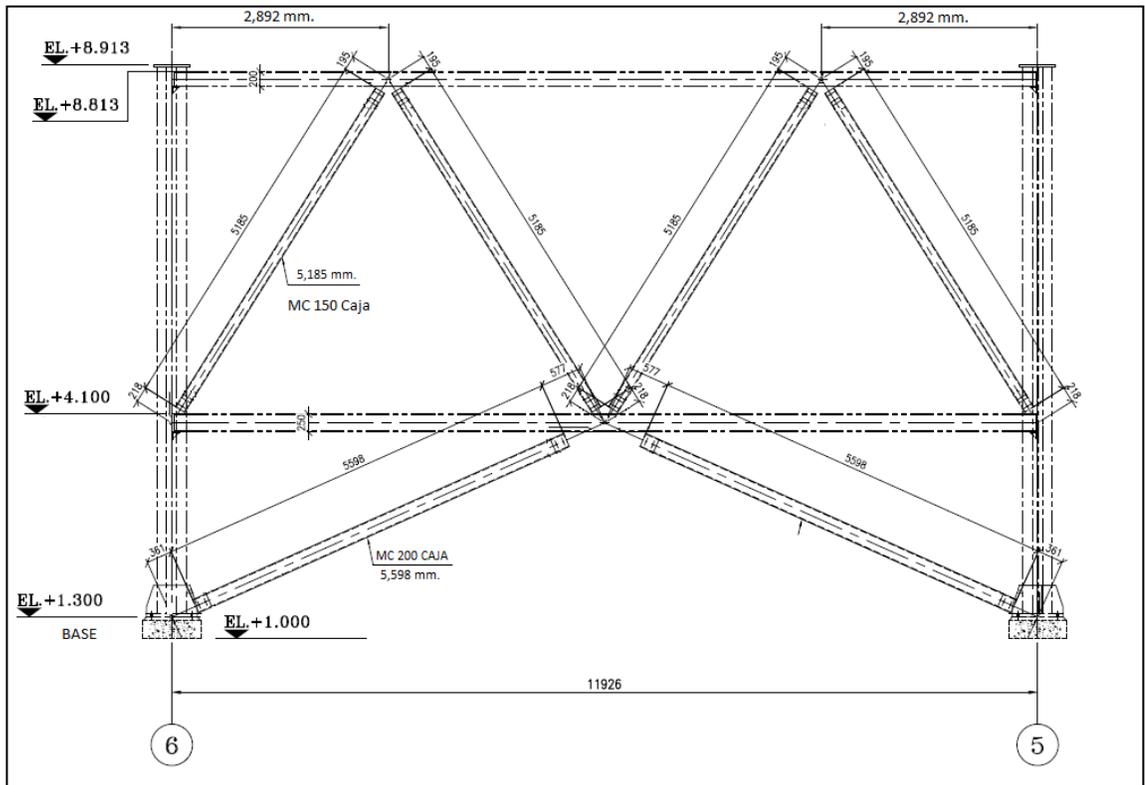


Fuente: Clyde Bergemann. Plano No. D 12 2/7.

Las diez columnas están sujetas a lo largo y ancho del precipitador por medio de vigas I, vigas C y platinas (ver figuras 8 y 9) en el nivel 4,1 m. En el contorno del precipitador tiene 8 vigas ISMB 200 con un largo cada una de 3,77 m y 2 vigas ISMB 250 con un largo de 11,90 m. En la parte interna a lo ancho del precipitador tiene 3 vigas ISMB 250 con el mismo largo de las anteriores y uniendo las vigas a lo largo y ancho del precipitador, un juego de vigas C, que son MC 100, MC 150, MC 200 y MC 250 que pertenecen al primer piso del precipitador amarradas entre sí para colocar las láminas estriadas, todo lo anterior es de material IS: 2062 Gr. A.

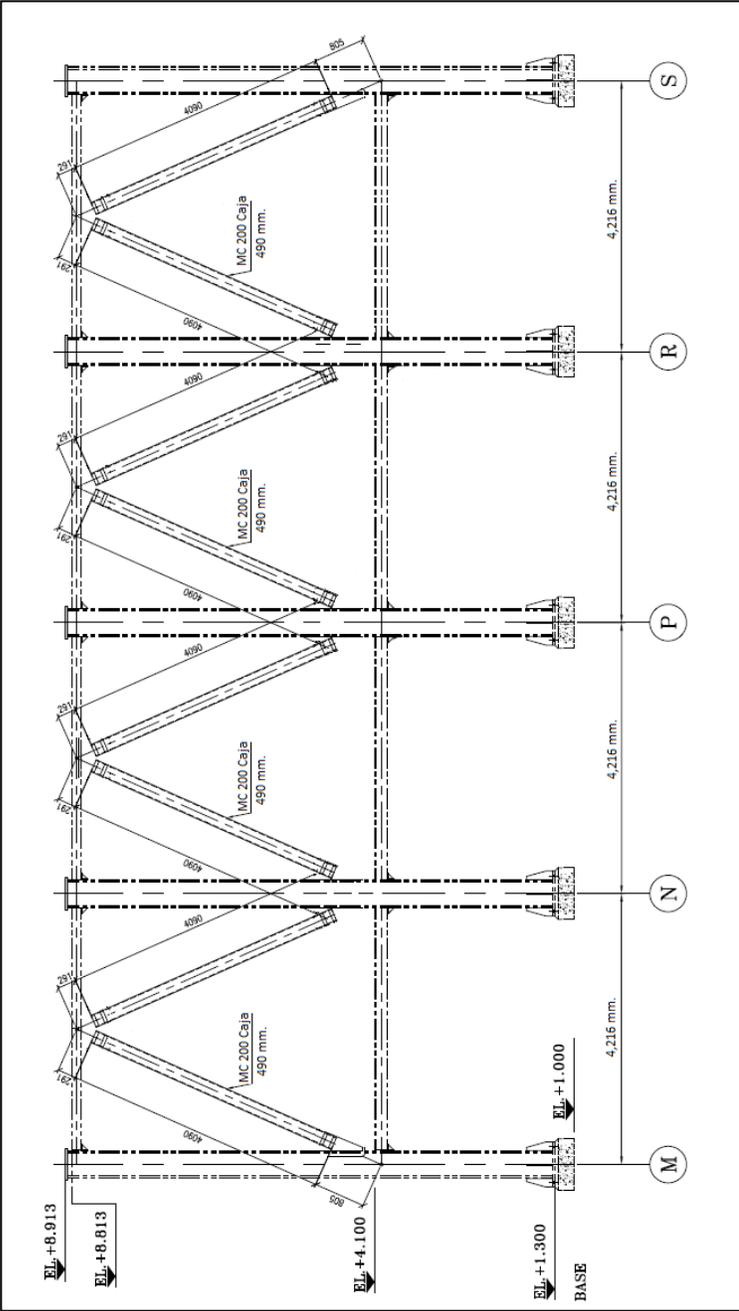
En el nivel 8,8 m, en el contorno cuenta con 8 vigas MC 150 tipo caja con un largo de 4,1 m, 2 vigas MC 200 tipo caja de un largo de 11,90 m y 3 vigas con las mismas características de las anteriores uniendo la parte alta de las columnas principales. A lo ancho, en un corte transversal se instalaron 30 vigas, 20 vigas tipo MC 150 tipo caja con un largo de 5,1 m y 10 vigas tipo MC 200 tipo caja con un largo de 5,5 m, todo este material es IS: 2062 Gr. A.

Figura 8. Elevación transversal de la estructura base



Fuente: Clyde Bergemann. Plano No. D 12 5/7.

Figura 9. Elevación longitudinal de la estructura base



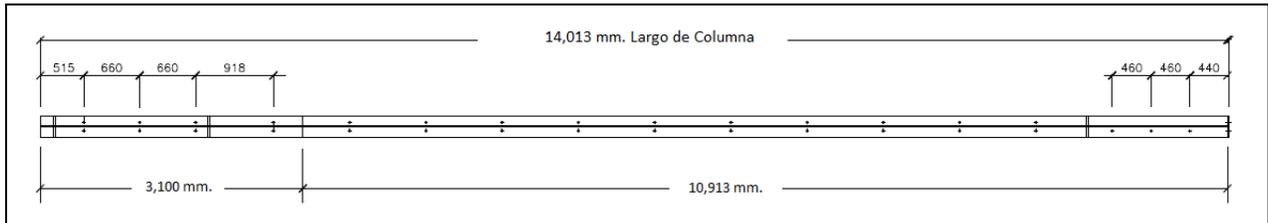
Fuente: Clyde Bergemann. Plano No. D 12 5/7.

2.1.2. Estructura campo colector de ceniza

En esta área es donde se lleva a cabo la recolección de ceniza por medio del campo eléctrico, está compuesta por cuatro campos estructurales, tiene diez columnas tipo I ISMB 250 con un grosor de 20 mm de un largo de 14m (ver figura 10). En la parte inferior, las columnas cuentan con una platina de 55 cm x 55 cm con un espesor de 40 mm, uniéndose en la parte media de la platina con la viga por medio de un angular de 75 mm x 75 mm con un largo de 150 mm y un grosor de 6 mm. Entre la columna principal y la columna del campo colector cuenta con una lámina de teflón de 8 mm de grosor, con el objetivo de darle libertad al movimiento longitudinal de todo el precipitador, movimiento que se debe al crecimiento que tiene el metal por la temperatura.

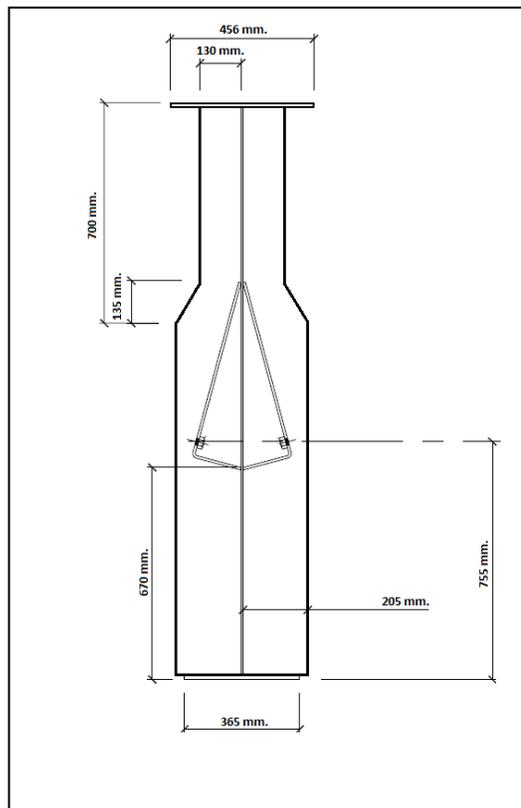
En el nivel 8,8m, a lo ancho del precipitador en los 5 puntos de las columnas principales cuenta con vigas de amarre que partirán del nivel 8,8 m hacia arriba y a su vez tendrán como función detener y darle inicio a las tolvas de salida de la ceniza, las vigas de amarre tienen un largo de 11,52 m y un alto de 1,8 m (ver figura 11). En la parte superior de las columnas, en el nivel 22 m, en los 5 puntos de las columnas del campo colector cuenta con otras vigas de amarre que partirán del nivel 22 m hacia abajo y al mismo tiempo tendrán como función sostener todo el sistema de placas colectoras, las vigas tienen las siguientes dimensiones: largo 11,5 m y alto de 1,6 m (ver figura 12).

Figura 10. **Columnas del campo colector**



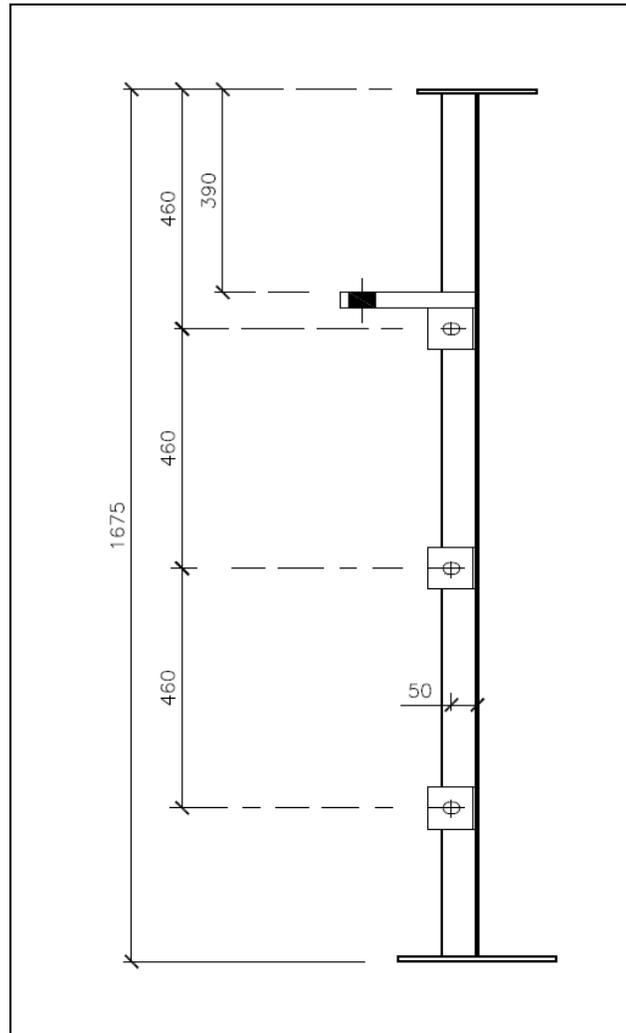
Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 32 3/3.*

Figura 11. **Viga, parte baja del campo colector**



Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 35 1/1.*

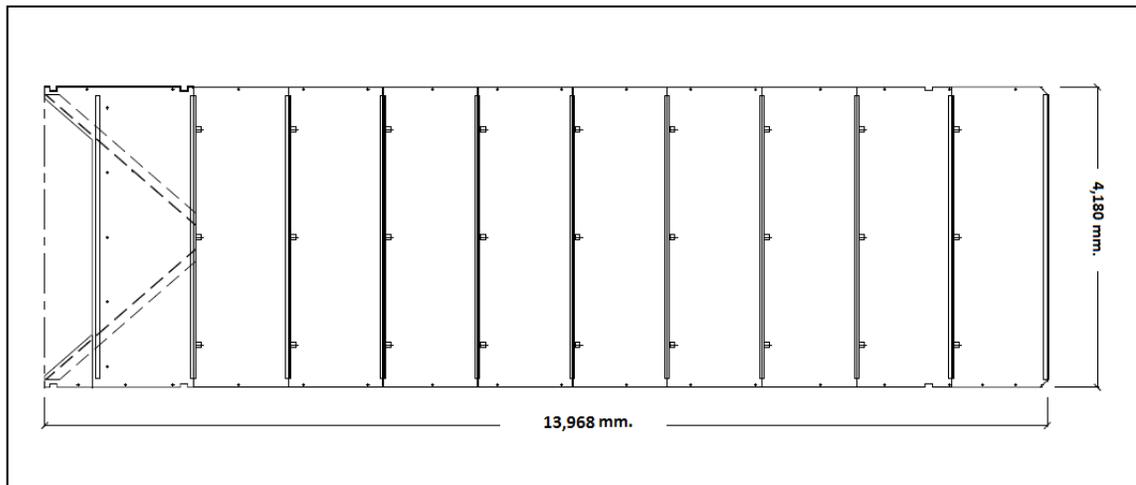
Figura 12. **Viga, parte alta campo colector**



Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 37 1/1.*

En los laterales del campo colector y arriba está sellado herméticamente con lámina de 6mm de espesor (ver figura 13), en la entrada y salida estarán las boquillas que direccionarán el gas.

Figura 13. Lámina perimetral

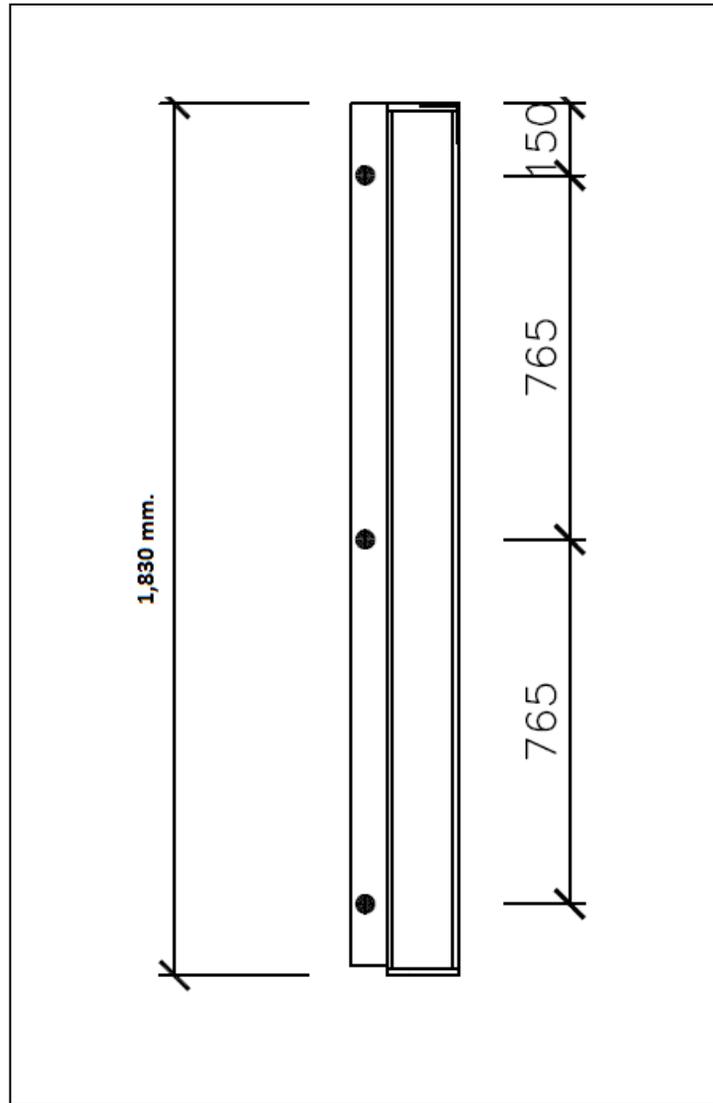


Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 32 3/3.*

2.1.3. Estructura del sistema de aislamiento eléctrico

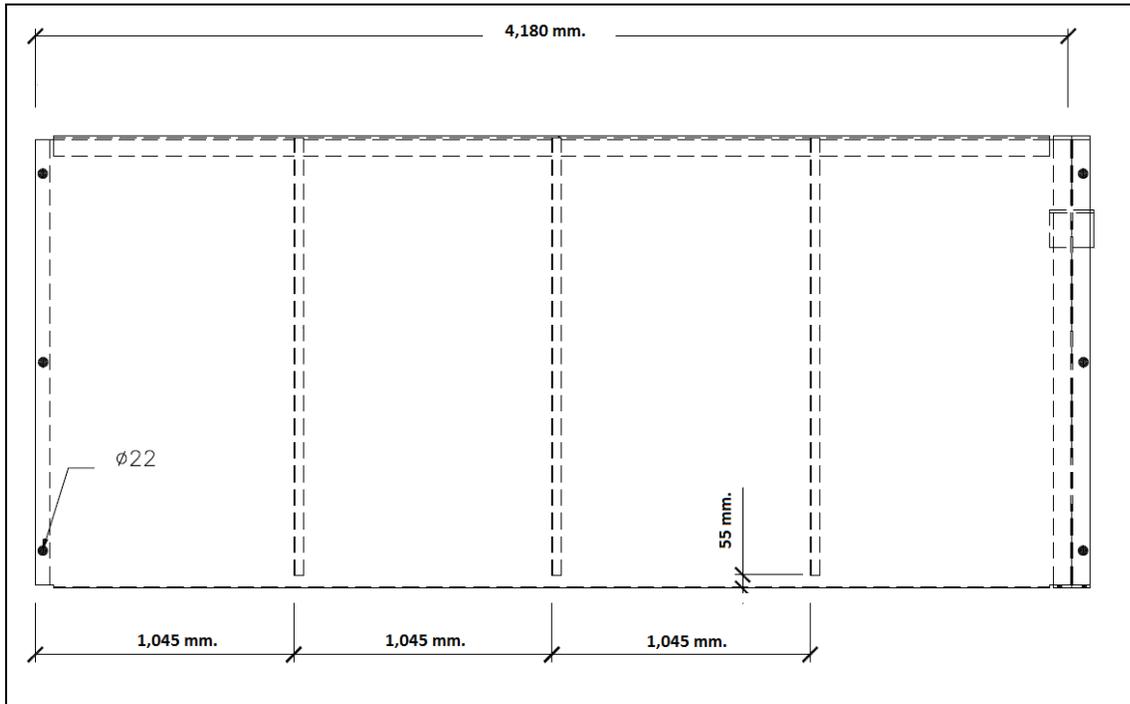
Esta estructura se encuentra entre el campo colector y la estructura de los transformadores, tiene 10 columnas tipo H (ver figura 14) de una altura de 1830mm, un ancho de 150mm y un alma de 138mm, a su alrededor tiene 10 láminas de 6mm de una altura de 1830mm y un largo de 4210mm (ver figura 15). En la parte de arriba de las columnas tipo H cuenta con 5 vigas I que sirven de sujeción a lo ancho del precipitador entre las columnas tipo H y, al mismo tiempo son para sujetar el techo de esta área o piso de la parte de la estructura de los transformadores.

Figura 14. **Columna del sistema de aislamiento**



Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No D 42 1/1.*

Figura 15. Pared del sistema de aislamiento



Fuente: Clyde Bergemann. Plano No. D 42 1/1.

2.1.4. Estructura de los elementos eléctricos

Esta estructura se encuentra en el inicio del nivel 24m, por encima del precipitador, después del área de aislamiento eléctrico y el piso de posicionamiento de los elementos eléctricos, vibradores y transformadores. Su objetivo es transportar los transformadores hacia un punto específico en la parte alta del precipitador para ser bajados para su cambio, mantenimiento o reparación que no se pueda llevar a cabo en el área instalada.

Teniendo una vista de planta del precipitador, las 8 columnas principales de esta estructura de los transformadores están posicionadas en la parte media

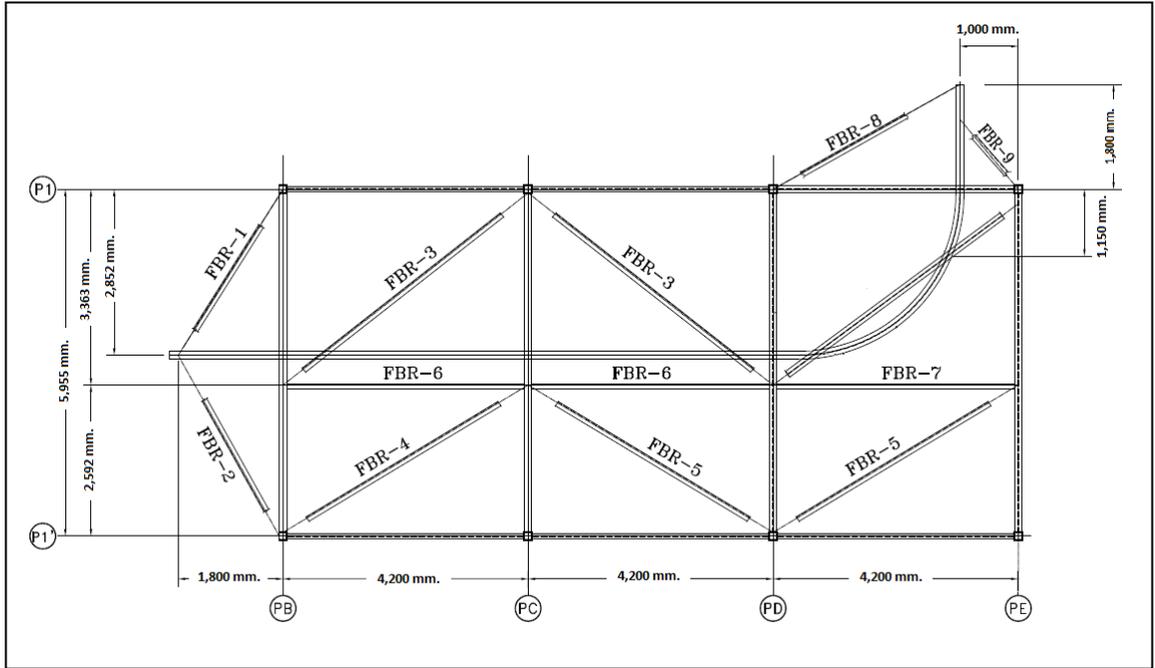
hacia la izquierda (ver figura 16). Las columnas tienen una altura de 4,4 m, fueron construidas a través de dos vigas C encontradas para formar una caja de MC 125. En la parte de abajo, para soporte, tienen una placa cuadrada de 25 cm con un grueso de 16 mm y en la parte alta únicamente una tapadera cuadra de 15 cm, para evitar que se introduzca agua. Están colocadas a una distancia de 6 m entre ellas, visto desde frente, y a 4,2 m, visto desde el lateral del precipitador (ver figura 17). En el nivel 28,4 m las columnas están amarradas por 13 angulares de diferentes medidas (ver figura 16).

Tabla III. **Lista de materiales estructura de los elementos eléctricos**

| LISTA DE MATERIALES | | | |
|---------------------|-----|---------------------------------|-------|
| MARCA | No. | DESCRIPCIÓN | CANT. |
| C-1 | 1 | MC 125 4,400 mm. L | 2 |
| | 2 | Platina 50 mm. X 6 Thk. 4,400 L | 2 |
| | 3 | Platina 250 mm. X 16 Thk. 250 L | 1 |
| | 4 | Platina 241 mm. X 10 Thk. 426 L | 1 |
| | 5 | Angular 70x50x8 mm. - 90 L | 1 |
| | 6 | Platina 264 mm. X 10 Thk. 391 L | 1 |
| | 7 | Platina 145 mm. X 10 Thk. 150 L | 1 |
| | 8 | Angular 70x50x8 mm. - 170 L | 1 |
| C-2 | 1 | MC 125 4,400 mm. L | 2 |
| | 2 | Platina 50 mm. X 6 Thk. 4,400 L | 2 |
| | 3 | Platina 250 mm. X 16 Thk. 250 L | 1 |
| | 4 | Platina 241 mm. X 10 Thk. 426 L | 2 |
| | 5 | Angular 70x50x8 mm. - 90 L | 2 |
| | 6 | Platina 145 mm. X 10 Thk. 150 L | 1 |
| | 7 | Angular 70x50x8 mm. - 170 L | 1 |
| C-3 | 1 | MC 125 4,400 mm. L | 2 |
| | 2 | Platina 50 mm. X 6 Thk. 4,400 L | 2 |
| | 3 | Platina 250 mm. X 16 Thk. 250 L | 1 |
| | 4 | Platina 241 mm. X 10 Thk. 426 L | 1 |
| | 5 | Angular 70x50x8 mm. - 90 L | 1 |
| | 6 | Platina 145 mm. X 10 Thk. 150 L | 1 |
| | 7 | Angular 70x50x8 mm. - 170 L | 1 |
| | 8 | Platina 273 mm. X 10 Thk. 437 L | 1 |
| C-4 | 1 | MC 125 4,400 mm. L | 2 |
| | 2 | Platina 50 mm. X 6 Thk. 4,400 L | 2 |
| | 3 | Platina 250 mm. X 16 Thk. 250 L | 1 |
| | 4 | Platina 241 mm. X 10 Thk. 426 L | 1 |
| | 5 | Angular 70x50x8 mm. - 90 L | 1 |
| | 6 | Platina 145 mm. X 10 Thk. 150 L | 1 |
| | 7 | Angular 70x50x8 mm. - 170 L | 1 |
| | 8 | Platina 276 mm. X 10 Thk. 389 L | 1 |
| C-5 | 1 | MC 125 4,400 mm. L | 2 |
| | 2 | Platina 50 mm. X 6 Thk. 4,400 L | 2 |
| | 3 | Platina 250 mm. X 16 Thk. 250 L | 1 |
| | 4 | Platina 241 mm. X 10 Thk. 426 L | 1 |
| | 5 | Angular 70x50x8 mm. - 90 L | 1 |
| | 6 | Platina 145 mm. X 10 Thk. 150 L | 1 |
| | 7 | Angular 70x50x8 mm. - 170 L | 2 |
| | 8 | Platina 248 mm. X 10 Thk. 396 L | 1 |
| FBR-1 | 9 | Angular 90x90x8 - 3106 mm. L | 1 |
| FBR-2 | 10 | Angular 90x90x8 - 3330 mm. L | 1 |
| FBR-3 | 11 | Angular 90x90x8 - 5103 mm. L | 1 |
| FBR-4 | 12 | Angular 90x90x8 - 4580 mm. L | 1 |
| FBR-5 | 13 | Angular 90x90x8 - 4541 mm. L | 1 |
| FBR-6 | 14 | Angular 90x90x8 - 4164 mm. L | 1 |
| FBR-7 | 15 | Angular 90x90x8 - 4109 mm. L | 1 |
| FBR-8 | 16 | Angular 90x90x8 - 3431 mm. L | 1 |
| FBR-9 | 17 | Angular 90x90x8 - 1074 mm. L | 1 |

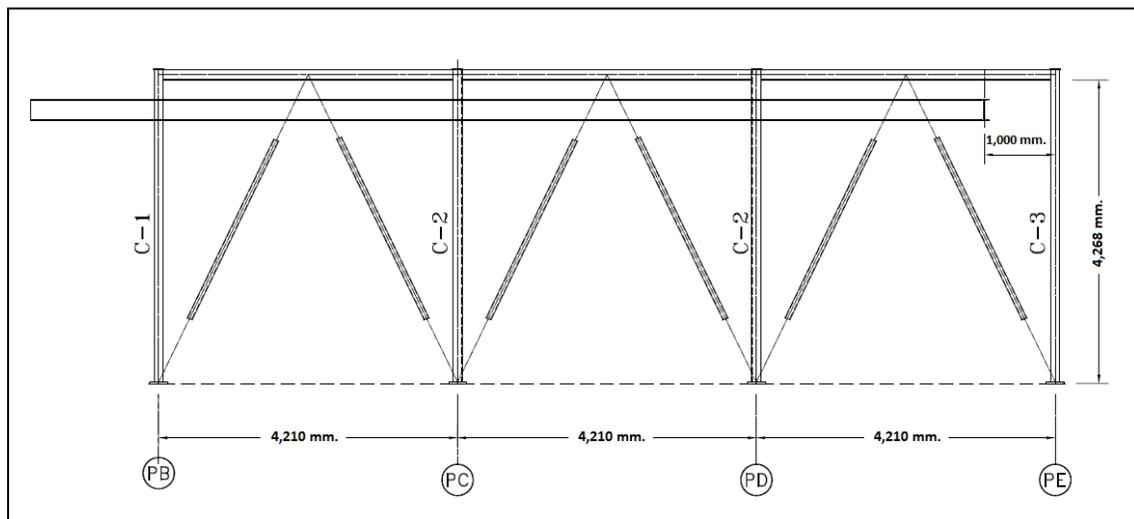
Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 17 2/4.*

Figura 16. Estructura para transformadores



Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 17 1/4.*

Figura 17. Elevación lateral soportes



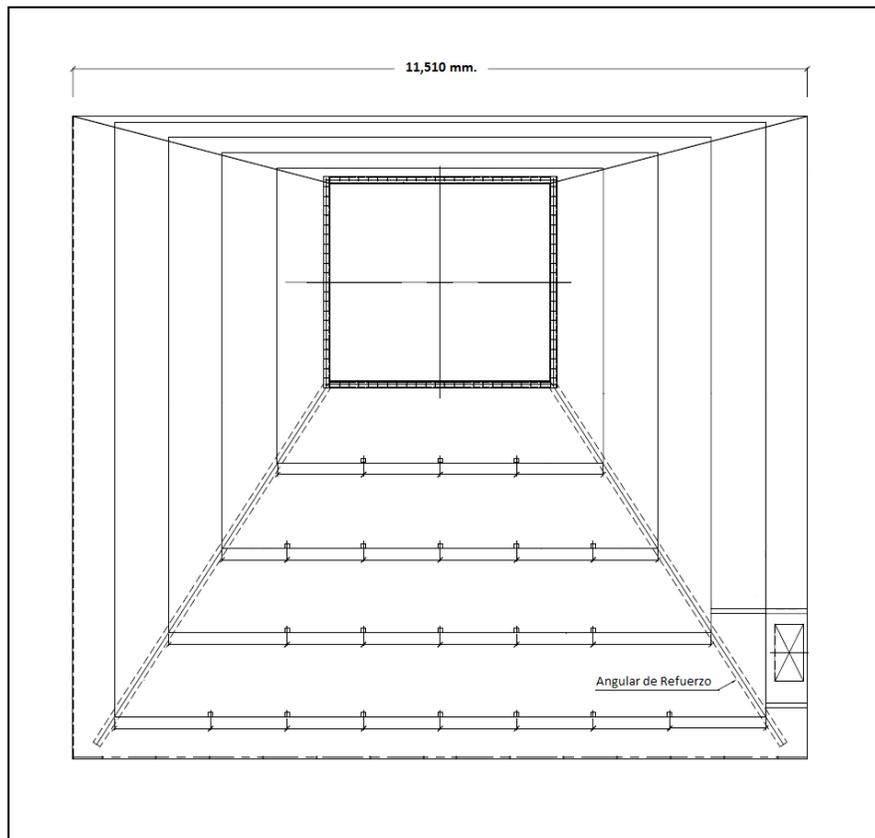
Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 17 1/4.*

2.2. Boquillas de entrada y salida del gas

El precipitador cuenta con dos boquillas, una de entrada y otra de salida, para direccionar los gases de combustión provenientes del hogar de la caldera. La boquilla de entrada direcciona el flujo hacia el precipitador, específicamente al campo colector de ceniza, y la boquilla de salida direcciona el flujo hacia los ductos que conectan a los ventiladores inducidos de la caldera. Las boquillas tienen la forma de pirámide, para ir de una menor área hacia una mayor área. Dichos elementos tienen una entrada de $10,7 \text{ m}^2$ y una salida de $119,5 \text{ m}^2$, el volumen de las boquillas está compuesto por láminas de 6mm y reforzadas para unir las entre sí en la parte de afuera por medio de vigas C de distintos tamaños, según se vaya avanzando a lo largo de la pirámide. Por dentro, las aristas de la boquilla están reforzadas con angulares de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ de ancho (ver figura 18).

La boquilla de entrada está montada en la dirección de menor área hacia la de mayor área en dirección del flujo de gases. Dicho diseño es para tener una menor velocidad dentro del campo recolector de ceniza, cumpliendo así el efecto del tubo de venturi, con el objetivo de que la máquina realice su trabajo de recolección de partículas pesadas. La boquilla de salida está montada de mayor a menor área, los gases que estén pasando por aquí serán gases que ya no contienen hollín y algunas otras partículas pesadas. Estos gases serán direccionados hacia los ventiladores inducidos de la caldera por medio de los ductos, para ser descargados al ambiente por la chimenea.

Figura 18. **Boquilla entrada y salida de gases**



Fuente: Clyde Bergemann. *Plano No. D 15 1/2.*

2.2.1. Distribuidores del gas

Dentro de las boquillas de entrada y salida del precipitador se instalaron pantallas distribuidoras de gas, la boquilla de entrada tiene tres pantallas. Estas pantallas son de diferentes dimensiones cada una. En la dirección del flujo de gas se encuentra la más pequeña, a una distancia de 1,35 m del inicio de la boquilla de entrada, tiene 12 láminas de un espesor de 2,5 mm, 10 de ellas tienen una dimensión de 1,2 m x 2,53 m y las otras 2 son de 0,394 m x 2,53 m formando un área de 31,3 m².

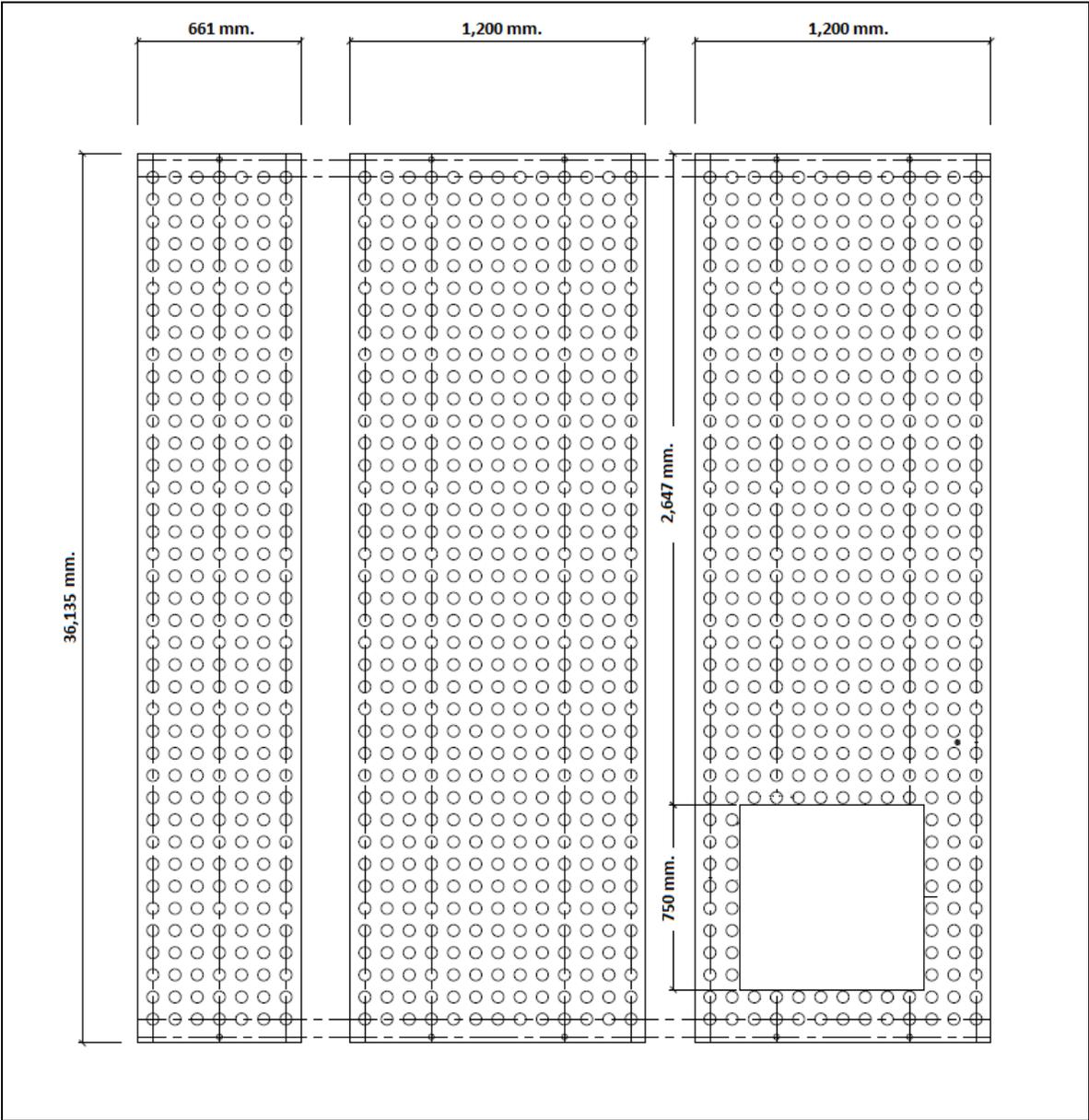
La segunda pantalla se encuentra a una distancia de 1,35 m de la primera. Esta tiene 18 láminas de un espesor de 2,5 mm, 14 de ellas tienen una dimensión de 1,2 m x 3,7 m y las otras 4 son de 0,66 m x 3,7 m, formando un área de 65,1 m². En la parte inferior izquierda la pantalla hay una puerta, para tener acceso hacia la primera pantalla a la hora de alguna inspección para alguna reparación.

La tercera pantalla está a una distancia de 1,42 m de la segunda. Esta tiene 22 láminas de un espesor de 2,5 mm, 18 de ellas tienen una dimensión de 1,20 m x 4,54 m y las otras 4 son de 0,91 m x 4,54 m, formando un área de 105 m². En la parte superior cuenta con un sistema de vibración para sacudir la ceniza que pueda quedarse en toda la superficie de la pantalla y en la parte inferior tiene instalada en todo el perímetro 11 láminas de 2,5 mm con forma de cepillo a un ángulo de 45° de la vertical, para que la ceniza pueda descender hacia las tolvas de descarga.

La boquilla de salida del precipitador únicamente cuenta con una pantalla a una distancia de 17,5 m de la tercera pantalla de la boquilla de entrada. Esta tiene 33 láminas de 2,5 mm, 9 de ellas tienen una dimensión de 1,2 m x 4,54 m,

2 láminas de 0,91 m x 4,54 m, 18 láminas de 1,2 m x 2,64 m y 4 láminas de 0,91 m x 2,64 m, formando un área de 112,3 m². Esta también cuenta en la parte superior con un sistema de vibración y agujeros para direccionar el flujo de aire sin exceso de turbulencia. Después de haber pasado el gas por todo el sistema de recolección, es muy probable que alguna cantidad de material (ceniza) llegue ionizado hasta la primer y única pantalla en la boquilla de salida y quedar atrapada en ella, es por eso que cuenta con el sistema de vibración. Todas estas piezas están acopladas entre sí por medio de angulares, platinas, tornillos y soldadura. Las pantallas distribuidoras están diseñadas con agujeros de distintos diámetros con el objetivo de distribuir y direccionar el flujo de aire y así evitar turbulencia dentro del recinto, para referencia ver la figura19.

Figura 19. Pantallas distribuidoras de gases



Fuente: Clyde Bergemann. Plano No. D 67 3/5.

2.3. Sistema colector de ceniza

El sistema colector está en la parte media del precipitador en forma de rectángulo visto de planta, en sus extremos cuenta con las boquillas de entrada y salida. La parte baja está sobre la estructura principal a una distancia de 9,82 m del nivel 0, entrelazándose con las boquillas de descarga de ceniza. En la vista lateral derecha e izquierda cuenta con 10 columnas de tipo I ISMB 250 con un grosor de 20mm de un largo de 14 m (ver figura 10), 5 de cada lado, sellado el sistema por completo con 116 láminas de 6mm. Adentro del sistema están las placas colectoras, electrodos y 10 vigas especiales de sujeción a lo ancho del precipitador, las cuales ya se describieron en la parte de la Estructura del campo colector. El funcionamiento específico de las placas y electrodo es el de captar la ceniza por medio de un campo electromagnético producido por la corriente directa alimentada por los transformadores.

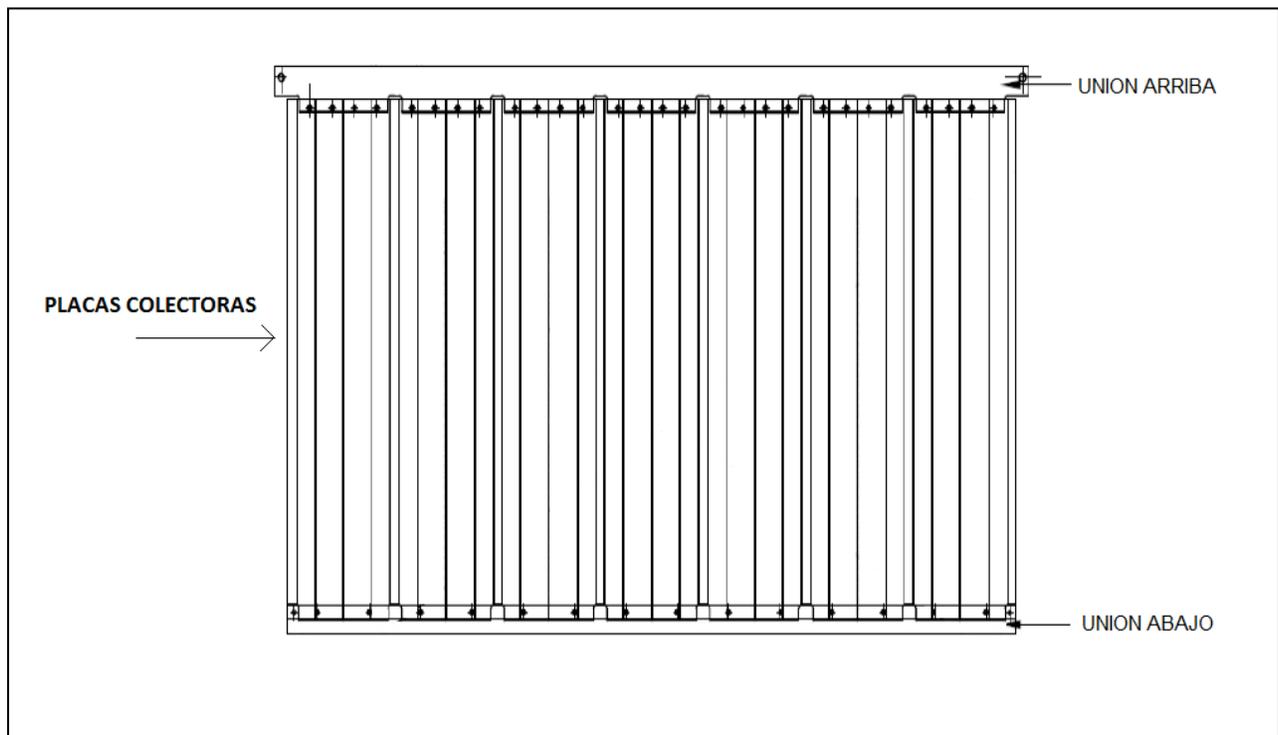
2.3.1. Placas colectoras

El precipitador cuenta con 116 placas colectoras, cada placa está compuesta por 7 láminas simétricas que tienen un largo de 10,81 m y un ancho de 0,49m con un espesor de 1,5 mm, estas son de un metal IS:513 (ver figuras 20 y 21). Las láminas fueron ensambladas con la herramienta especial que trabaja con presión de aire alimentado a través de un compresor y trabaja a una presión de 10 Bar, en sus extremos la herramienta tiene un molde especial que se acopla a la forma de las láminas para poder unir las (ver figura 22). La dimensión total de la placa es de 10,81 m x 3,73 m formando un área útil de captación de ceniza de 40,32 m².

En los extremos de las placas, a lo ancho, tiene instaladas dos piezas en forma de U que las une a lo ancho de ellas, con el objetivo de asegurarlas y

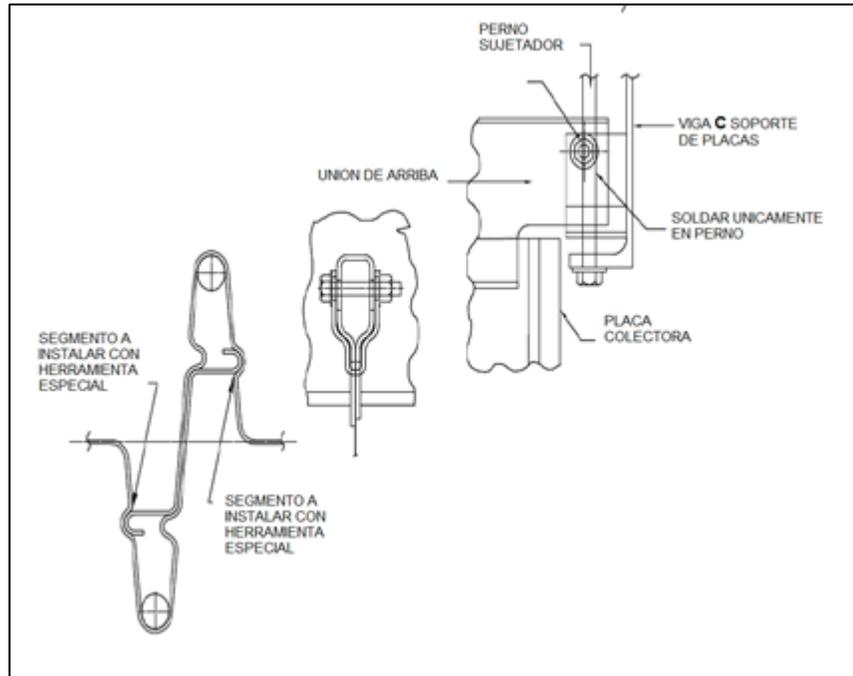
darles rigidez a la hora de estar en operación. Las placas están sujetas por medio de las piezas en forma de U en sus extremos hacia unas vigas C de largo 3,72 my un ancho de 0,30 m de un material IS 2062.Las vigas cuentan con soportes en forma de U inversa a la de los sujetadores de las placas, creando un efecto cóncavo convexo. Cada viga colgante está sujeta por medio de dos tornillos de 30mmde diámetro hacia las vigas especiales de amarre que abarcan todo el ancho del precipitador.

Figura 20. **Placas colectoras acopladas**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.59.

Figura 21. Perfil de placa colectora



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p. 59.

Figura 22. **Herramienta para unir placas colectoras**



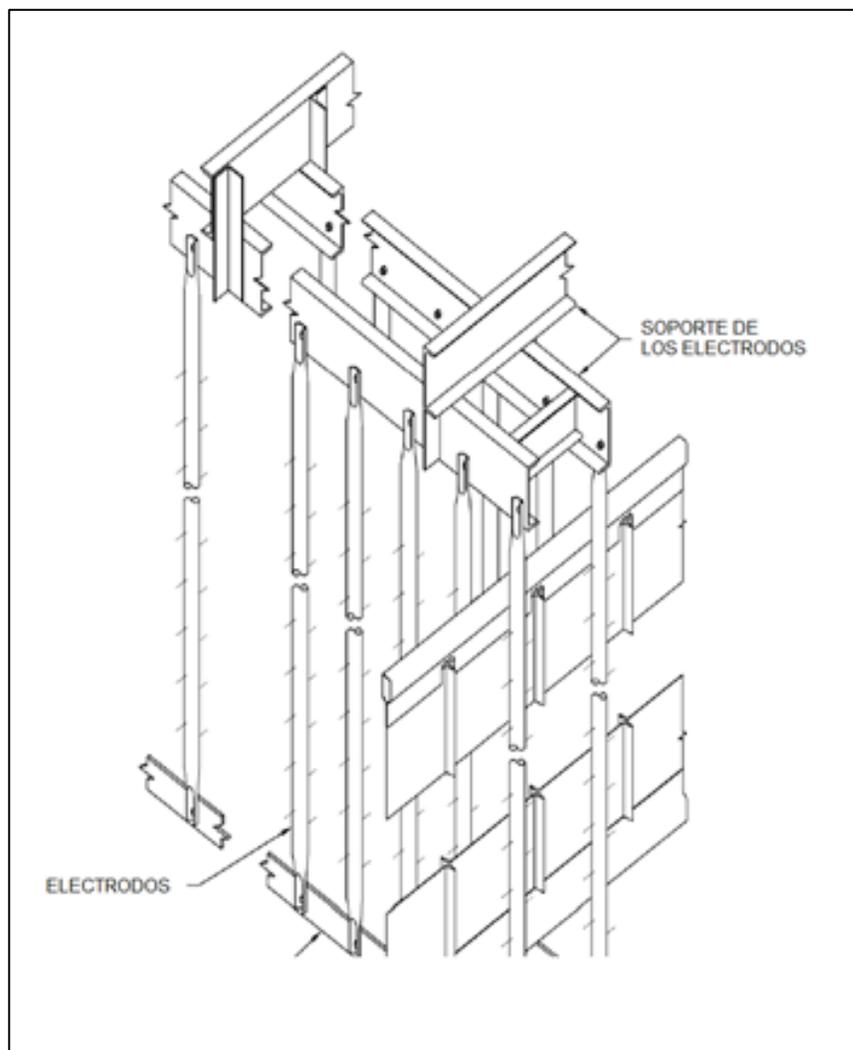
Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.58.

2.3.2. **Electrodos**

El sistema cuenta con 896 electrodos de material MS: IS 3074/ASTM 513, con un diámetro de 44,5 mm, largo de 11,7 m y un grosor de 1 mm. En sus extremos está diseñada de la siguiente manera: el cilindro en los últimos 15 cm se va convirtiendo en una pieza plana del doble del grosor de los electrodos, con el fin de poder sujetarse adecuadamente en la parte alta y baja. En la parte alta el electrodo está sujeto a una estructura de vigas C de material IS 2062 con un largo de 10,88 m y un ancho de 0,42 m (ver figura 23). El sistema colector está dividido en cuatro campos, dentro de cada división cuenta con 4 estructuras en la parte de arriba que soportan el juego de los electrodos y en la parte baja se instalaron unas guías de los electrodos para que estos estuvieran

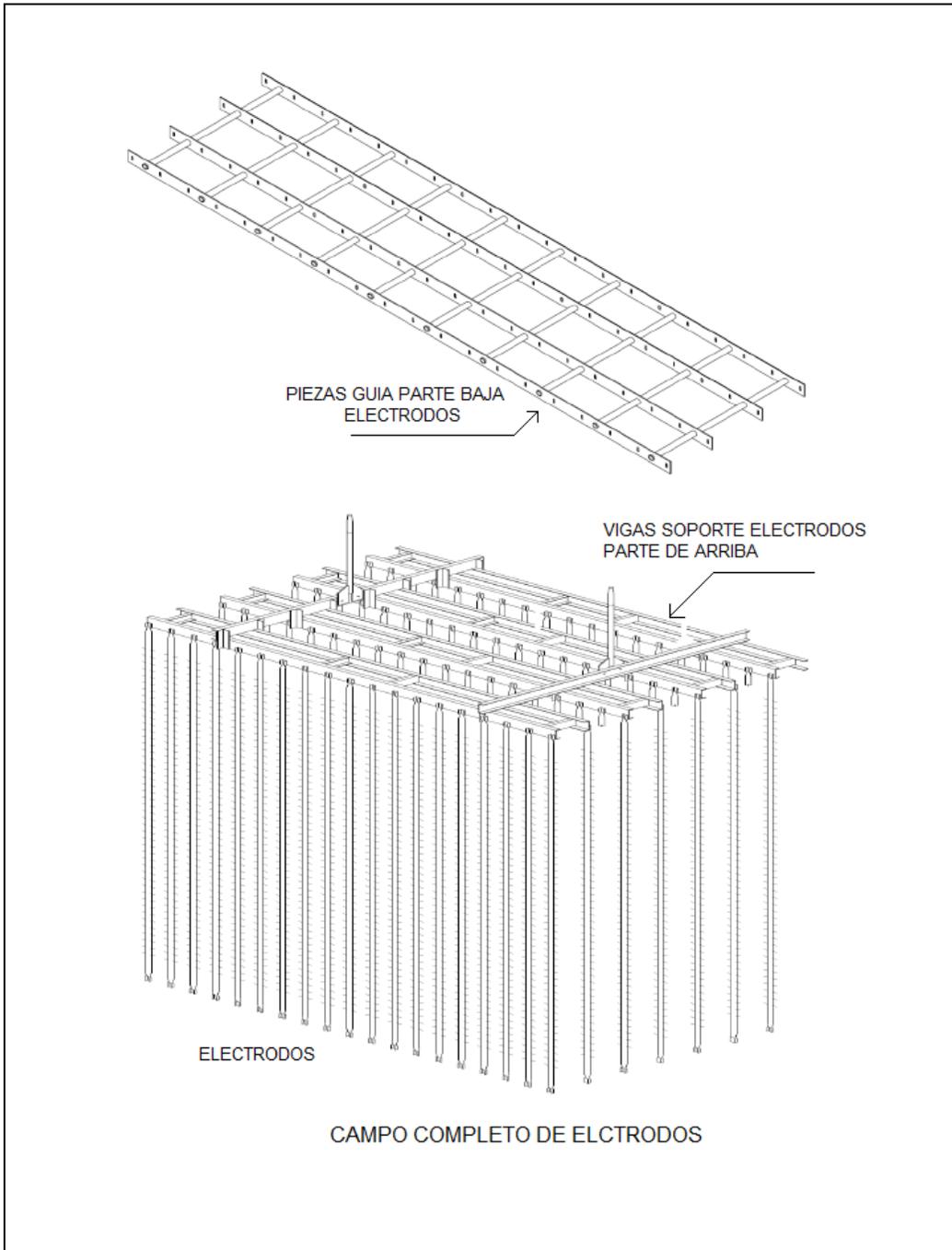
a plomo en todo momento. La perfección vertical es importante debido a que si existe una variación exagerada podría provocar arco eléctrico y por lo tanto se dispararía el campo, descendiendo así la eficiencia del precipitador(ver figura 24).

Figura 23. **Electrodos y sus soportes**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.103.

Figura 24. **Soporte de los electrodos**



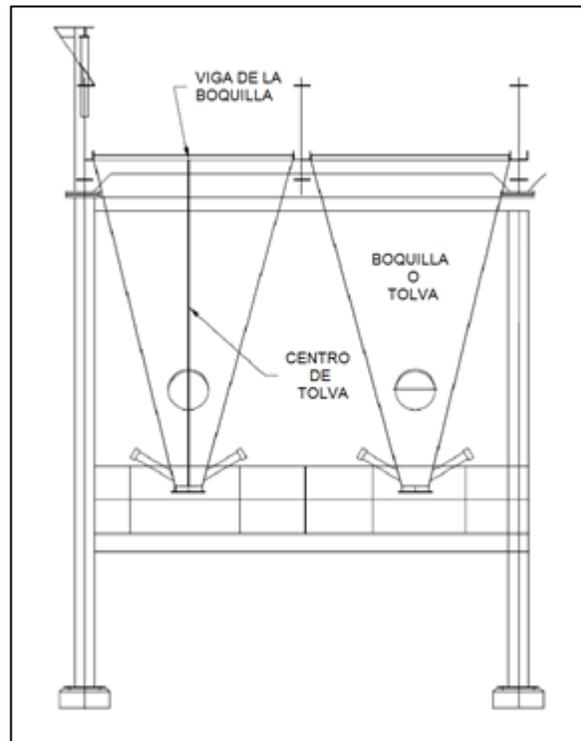
Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.117.

2.4. Boquillas de salida de ceniza

Después de haber sido captada la ceniza en las placas colectoras, estas son golpeadas en la parte de arriba por medio de un mecanismo electromecánico, la conexión entre el mecanismo y las placas es a través de un eje de 63mm. El eje es golpeado en la parte de arriba directamente por otro segmento de eje que está introducido en una bobina, al ser alimentada eléctricamente esta produce un campo que provoca que el segmento de eje se levante hasta el punto muerto superior y, al ser cortada la alimentación eléctrica, el segmento de eje cae súbitamente hacia la parte transversal del eje conector, produciéndose así un golpe martillo que hace vibrar la placa, dicha vibración provoca que la ceniza se desprenda de la placa y caiga por precipitación.

La ceniza es direccionada por medio de dos boquillas por campo, las boquillas tienen forma de pirámide y están colocadas de mayor a menor área en dirección del flujo de la ceniza, con el objetivo de conducir las a través de un tubo de 300mm de diámetro para su descarga posterior.

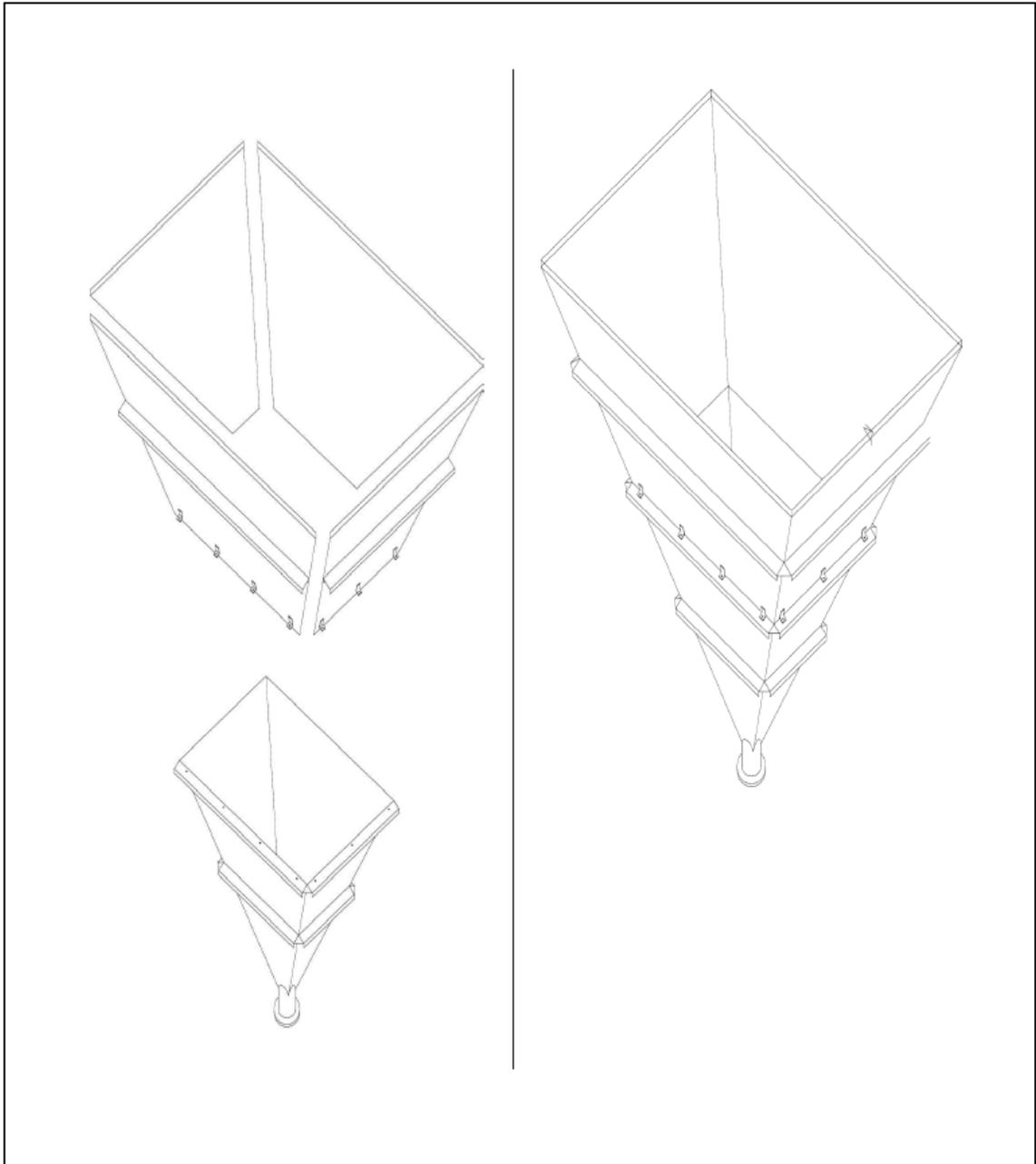
Figura 25. **Boquillas descarga de ceniza**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.93.

Las boquillas fueron ensambladas con 12 láminas de 6 mm que tienen forma trapezoidal y reforzadas perimetralmente con vigas C de 200 mm, 150 mm y 100 mm. La pieza tiene una puerta de registro, juntas expansivas en la parte baja (menor área) y una base en la mitad de la pieza para colocar el vibrador eléctrico (ver figura 25 y 26), todo el material es de IS 2062 Gr. A. En la parte interna de las boquillas en la tercera parte de abajo tiene una lámina de inoxidable de material INOX 316. La función de este segmento es de disminuir el coeficiente de fricción y aumentar la resistencia al desgaste entre la boquilla y la ceniza, y así provocar que el material tenga más tiempo de vida útil.

Figura 26. **Isométrico de las boquillas**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.114.

3. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO

En el Ingenio La Unión, en 2012 inició operaciones la refinería, debido a esa demanda y a la proyección de venta de energía eléctrica, fue necesaria la ampliación en el área de generación con el montaje de la caldera 8 y el precipitador electroestático para controlar la contaminación emitida debido a la quema de combustible biomasa.

3.1. Características y consideraciones que se van a estudiar

Debido a que la caldera 8 funciona con carbón y bagazo y que el Ingenio desea bajar sus costos en el uso de agua y químico utilizados en los otros sistemas de captación de ceniza, fue necesario instalar un captador de ceniza tipo seco que cumpliera con las expectativas esperadas del ingenio. Dentro de las características que se tomaron en cuenta están:

- La cimentación de la estructura consiste en 2 plataformas con 5 zapatas cada una.
- La estructura principal será anclada a diez zapatas, esto servirá soporte de todo el equipo.
- Es importante poner mucha atención en el crecimiento que tendrá la estructura, a lo largo llevará material especial intermedio entre la unión de la estructura principal e intermedia (en montaje contará con vigas

provisionales y en proceso placas de teflón que servirá para deslizamiento adecuado y direccionado de la estructura).

- Deberán colocarse mallas distribuidoras de los gases en la entrada y salida, esto lleva una posición específica.
- La placas colectoras y electrodos diseñadas por fabricante, deberán estar alineados perfectamente para que estos realicen su función adecuadamente.
- Los electrodos estarán conectados a la parte negativa del circuito y las placas colectoras a la parte positiva, con esto se provocará un campo eléctrico. Estos electrodos estarán conectados por medio de un mecanismo de comunicación mecánica y serán aislados con un cilindro cerámico, al mismo tiempo tendrá conexión con el sistema de vibración para los electrodos y placas específicamente.
- Contará con 79 vibradores, 60 en las placas colectoras, 16 en los electrodos y 3 en las mallas distribuidoras de los gases, estos tendrán como función precipitar toda la ceniza adherida, principalmente en las placas.
- Contará con 8 tolvas de descarga de ceniza, estas llevarán vibradores pequeños (independientes del sistema recolector) para evitar que la ceniza se adhiera a las paredes.
- El campo eléctrico será suministrado por medio de 4 transformadores.

3.2. Estructura de los cimientos del precipitador electrostático

Es una base de concreto armado en la que en su diseño se debe contemplar: el soporte del peso de la máquina (carga muerta), cargas vivas, carga de ceniza, carga de viento y la resistencia a las vibraciones. Las cargas son analizadas en los tres ejes X, Y, Z, estas varían según posición en las bases del precipitador (ver tabla IV), en la tabla únicamente se muestran las cargas más altas en algunos puntos de las columnas principales.

Tabla IV. Cargas actuantes sobre el precipitador

| TIPOS DE CARGAS | DATO MAYOR (KN) |
|-----------------|-----------------|
| CARGAS MUERTAS | 460 |
| CARGAS VIVAS | 321 |
| CARGA DE CENIZA | 590 |
| CARGA SISMICA | 734 |
| CARGA VIENTO | 96 |

Fuente: elaboración propia, datos tomados del *Plano No. D 1 1/1. Diagramas de cargas.*

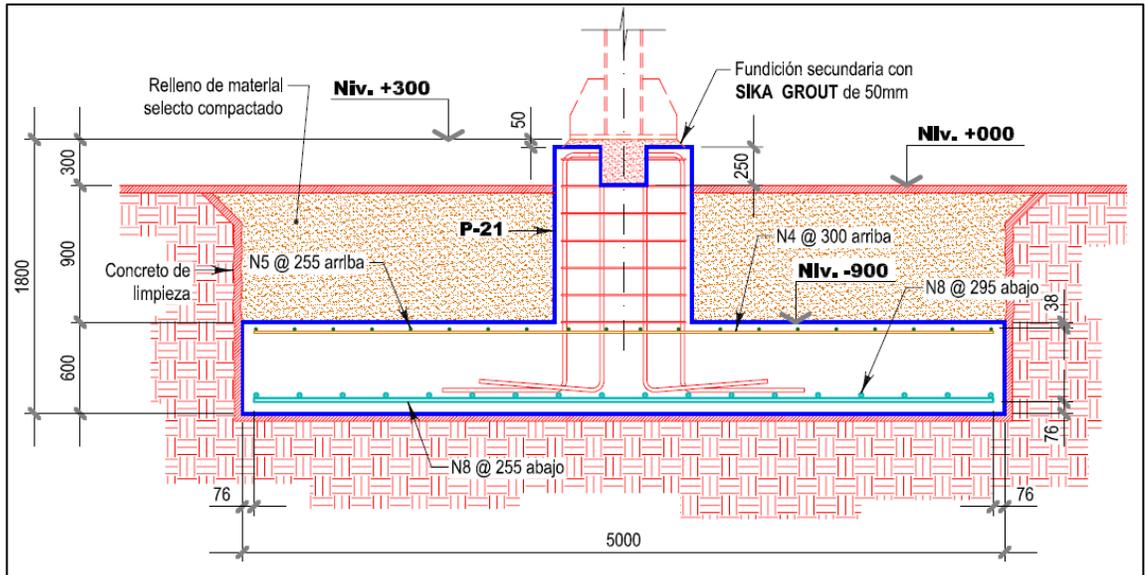
Fue diseñada de forma que pueda soportar algún tipo de carga sísmica y no permitir de ninguna manera deflexiones. Para su diseño fue necesario contar con un estudio de suelos y cimentaciones. Dicho reporte contiene datos de sondeo hechos por Rodio – Swissboring en el Ingenio La Unión en el área a instalar el precipitador, ensayos de laboratorio, conclusiones y recomendaciones. El estudio tiene como objetivo alcanzar los siguientes puntos: característica de los suelos, situación del nivel freático, tipos de cimentación recomendables, capacidad portante y cota de cimentación y estimación de los asentamientos que pueden producirse. Con estos datos y los planos generales del precipitador, el cual proporciona las características

exactas, se prosigue al diseño de las bases analizadas por el ingeniero civil, dicha obra fue realizada por la empresa B2V2.

Las plataformas en las cuales están soportados los pedestales tienen una dimensión de 5m de ancho por 20m de largo y una profundidad de 60 centímetros. La parte más baja de la plataforma está a un nivel de - 1500 mm del nivel cero, a ese nivel después del concreto de limpieza se inicia la malla estructural que comprende 295 varillas de 1 plg diámetro y 19,7 m de largo. Arriba de esta, 255 varillas de 1 plg de diámetro y un largo de 4,85 m, iniciando de allí la parte baja del pedestal, a una distancia de 60 centímetros continua con la segunda malla que está comprendida por 300 varillas de ½plg de diámetro y por encima de estas 255 varillas de 5/8 plg de diámetro con los mismos de los de la primera malla (ver figura 27).

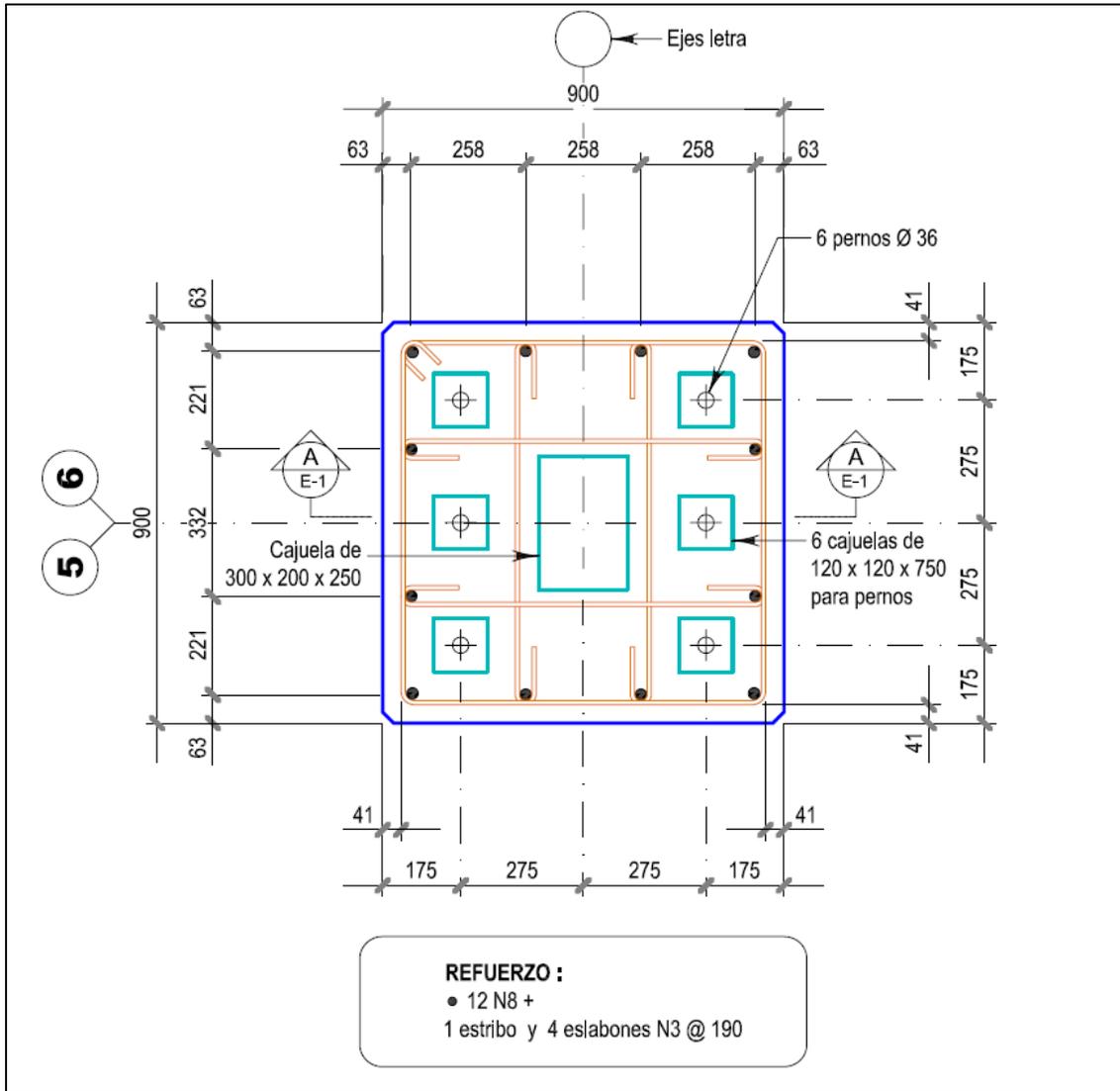
El pedestal tiene una medida 90 cm ancho x 90 cm de largo por una profundidad de 1,75 m, introduciéndose en la parte baja de la plataforma una distancia de 60 cm. El refuerzo estructural del pedestal consta de 12 varillas de 1 plg de diámetro, de 1,75 m de largo con quiebre en L al final e inicio de la plataforma con una distancia de 80cm de introducción en la plataforma. Contiene también 7 estribos con 4 eslabones con varilla de 3/8 plg, cuenta con una cajuela en el centro geométrico de 30 cm x 20 cm x 25 cm para que entre una X de la viga principal del precipitador (ver figuras 28 y 29). Los 60 pernos de anclaje hacia las columnas principales se introdujeron en los pedestales antes de la fundición, siendo estos de un diámetro de 36 mm y un largo de 98 cm, de un material IS: 2062 Gr. A.

Figura 27. **Plataforma cimiento ESP**



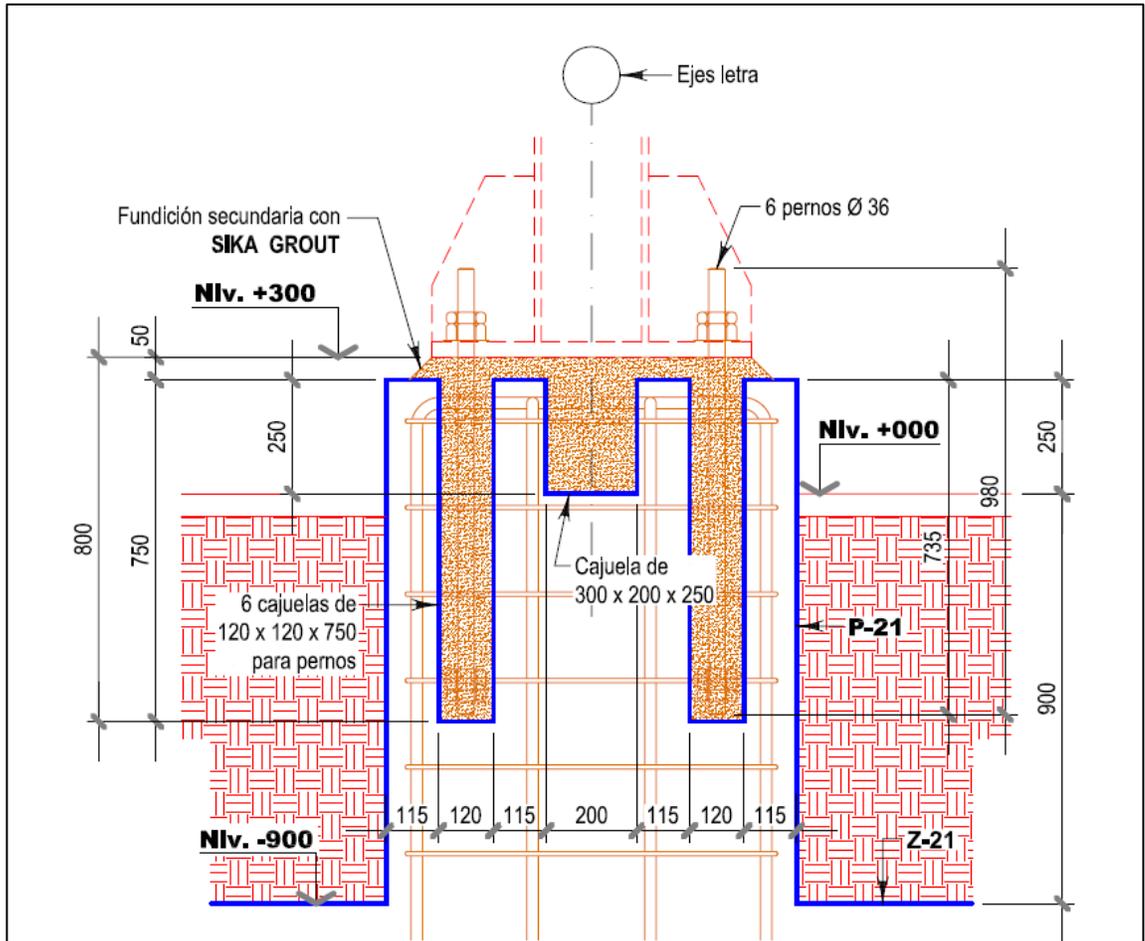
Fuente: LUARCA, S.A. *Plano No. LL-ILU-12602 ESP Detalle de cimientos.*

Figura 28. Pedestal, vista de planta



Fuente: LUARCA, S.A. Plano No. LL-ILU-12601 ESP Detalle de cimientos.

Figura 29. Vista lateral de pedestal ESP



Fuente: LUARCA, S.A. Plano No. LL-ILU-12601 ESP Detalle de cimientos.

El cemento utilizado es el 5000 estructural utilizado para cimentaciones, muros, columnas, losas y pisos para uso industrial. El soporte de este material es de 280 a 350 kg/cm² y la norma empleada es la ASTM C39, el contenido de aire atrapado es menor al 3%. Se debe tener especial cuidado a la hora de realizar la fundición de descarga directa, ya que por la manipulación, las medidas pueden variar y esto puede llevar a errores a lo largo de la instalación

de todas las piezas. Antes de realizar la fundición, es necesario verificar las medidas constantemente para que quede a escuadra (ver figura 30 y31).

Figura 30. **Estructura de pedestal**



Fuente: Ingenio La Unión.

Figura 31. **Pedestal finalizado**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3. Procedimiento del montaje del precipitador electroestático

El procedimiento del montaje está dividido en 7 segmentos bases, de estos segmentos se describen los pasos secuencialmente y también se presentan los protocolos que se cumplieron para garantizar el montaje del precipitador electroestático.

3.3.1. Columnas principales

Luego del tiempo de fraguado correspondiente a la cimentación (28 días de secado), se continuó con la instalación de las diez columnas principales, por medio de grúa, eslingas y grilletes (ver figura 32). En el pedestal se colocaron 4 espaciadores de 50mm X 100mm con un ancho de 50mm, con la finalidad de dejar el espacio correspondiente para la aplicación del Sikagrout AD, que será

la fundición secundaria. Dicha fundición queda pendiente hasta el momento que se tenga alineado perfectamente las columnas y vigas de amarre del segmento de recolección de ceniza.

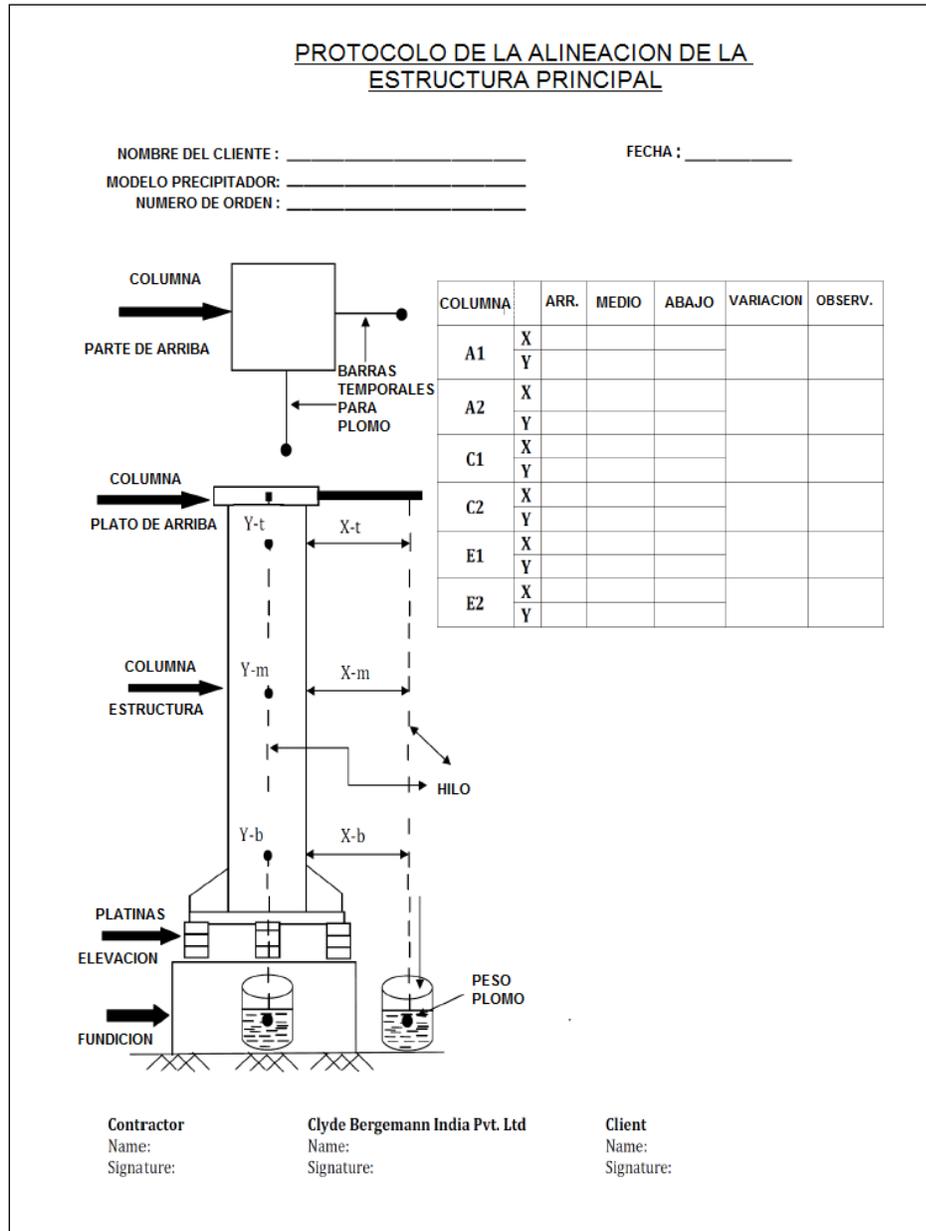
Figura 32. **Montaje columnas principales**



Fuente: Ingenio La Unión.

Existe un protocolo que se debe respetar para dejar perfectamente alineadas las piezas que el fabricante indique, con el objetivo que no se presente ningún inconveniente en las piezas que se instalen posteriormente. Se debe colocar un plomo en dos puntos a cada columna para que estas queden bien instaladas y que exista una variación mínima (ver figura 33).

Figura 33. **Protocolo para alineación de columnas**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p. 38.

Para darle rigidez a la estructura base, se procedió a la colocación de las vigas de amarre en el nivel 4,1m y 8,9 m, se inició con las primeras 8 vigas tipo I MB 200 en el nivel 4,1 m a lo largo del precipitador, dándole continuidad en el nivel 8,9 m con las otras 8 vigas C encontradas MC 150 tipo caja (ver tabla II). Al tener en su posición las vigas antes mencionadas, se instalaron 24 platinas que servirán de conexión entre las vigas de los niveles anteriores a través de las 16 vigas C encontradas MC 200 tipo caja. Entre las 24 platinas hay 8 platinas centrales y 16 que estarán posicionadas en las esquinas de los 8 cuadros creados por las posiciones de las vigas. Las vigas que conectan ambos niveles, una formará un ángulo de 204° respecto a la vertical del primer cuadrante en la dirección de las agujas del reloj, la otra viga será un ángulo de 156° respecto al mismo punto y la misma dirección, entre ellas tendrán un ángulo de 48° (ver figura 34).

Figura 34. **Amarres columnas principales**



Fuente: Ingenio La Unión.

A lo ancho de estos dos niveles en la dirección del flujo del gas se instalaron 5 vigas C MC 200 tipo caja nivel 8,9m y 5 vigas I MB 250 nivel 4,1m. El primer amarre está entre las dos vigas antes mencionadas y a través del largo del precipitador, consta de 20 vigas C MC 150 tipo caja con sus respectivas platinas de apoyo y formando sus ángulos respectivos. El segundo amarre que es el del nivel 4,1m hacia el 1,3m, este consta de 10 vigas MC 200 tipo caja con sus 20 platinas de anclaje. Todo el material utilizado en este segmento es un IS 2062 Gr. Ay fue soldado con electrodo Lincoln 7018.

3.3.1.1. Placas intermedias

Entre las columnas principales y las columnas del sistema colector de ceniza se instalaron unas placas que permitirán el crecimiento que tendrán el precipitador a lo largo. En el momento de tener ya alineada toda la estructura de la parte baja del precipitador (ver figura 35), se colocaron las bases metálicas de 300 mm x 300mm que contiene una plancha de teflón de 280mm x 280mm. El teflón no es reactivo químicamente, soporta temperaturas de hasta 270 °C y la característica más importante es que el coeficiente de rozamiento es bajo, es decir, la fricción que existe entre el teflón y el metal es bastante bajo, lo cual ayuda a que el desplazamiento de +- 12mm se lleve a cabo sin ninguna obstrucción. Dicho desplazamiento puede ser hacia las dos direcciones en el mismo eje (ver figura 36).

Figura 35. Alineación columnas parte alta

PROTOCOLO DE ALINEACIÓN DE TODAS LAS COLUMNAS PRINCIPALES

NOMBRE DEL CLIENTE : _____ FECHA : _____

MODELO PRECIPITADOR: _____

NUMERO DE ORDEN : _____

VISTA DE PLANTA COLUMNAS PRINCIPALES

| Dimension | Según Dibujo | Actual | Diferencia | Observación |
|-----------|--------------|--------|------------|-------------|
| A1 - C1 | | | | |
| C1 - E1 | | | | |
| A1 - A2 | | | | |
| C1 - C2 | | | | |
| E1 - E2 | | | | |
| A2 - C2 | | | | |
| C2 - E2 | | | | |
| A1 - E2 | | | | |
| A2 - E1 | | | | |
| A1 - C2 | | | | |
| A2 - C1 | | | | |
| C1 - E2 | | | | |
| C2 - E1 | | | | |

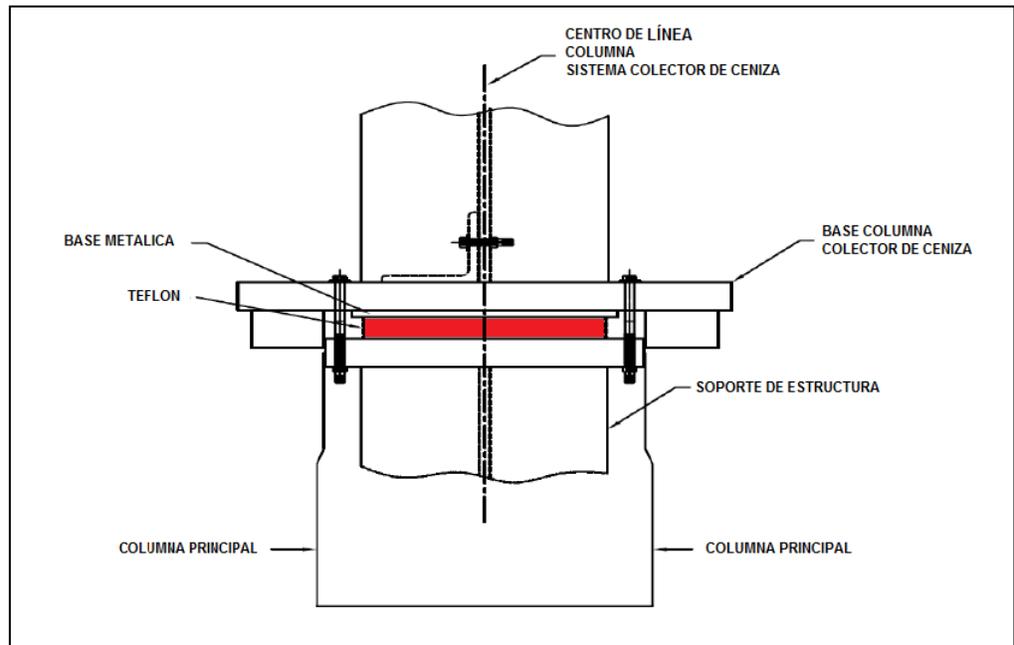
Contractor
Name: _____
Signature: _____

Clyde Bergemann India Pvt. Ltd
Name: _____
Signature: _____

Client
Name: _____
Signature: _____

Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*.p.39.

Figura 36. **Posición de teflón**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p.43.

3.3.2. **Boquillas de salida de ceniza**

Las boquillas de salida de ceniza fueron armadas independientemente y fuera del precipitador, se armaron al mismo tiempo que se levantaron las columnas principales. Luego, fueron trasladadas por medio de un manipulador telescópico hacia la parte de abajo del precipitador (ver figura 37), esperando que se instalaran las vigas especiales de la cuales se habló en el capítulo 2, debido a que las boquillas parten de la parte baja de la viga que va en el nivel 8,9 m .Su conicidad va de mayor a menor, del nivel 8,9 m hacia 4,1 m respectivamente, buscando el ducto que conducirá la ceniza hacia la descarga final.

Figura 37. **Boquillas salida de ceniza**



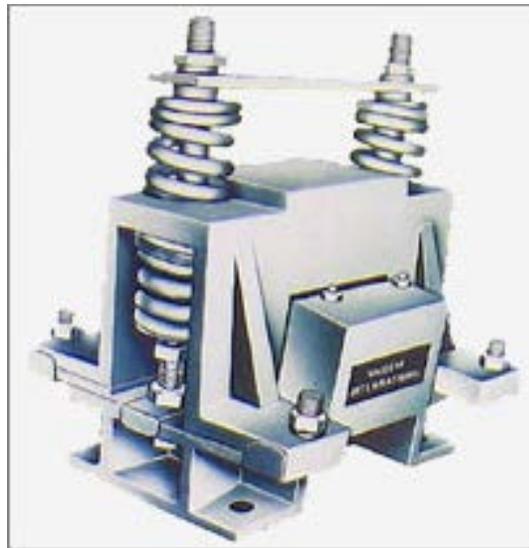
Fuente: Ingenio la Unión.

Luego de estar en posición las paredes del sistema colector de ceniza con las vigas especiales, cada boquilla cuenta con una puerta de acceso para acceder en el momento de su mantenimiento o alguna emergencia. Las boquillas fueron niveladas, instaladas en su punto final por medio de polipasto y soldadas.

3.3.2.1. Vibradores

Las 8 boquillas cuentan con una base metálica instalada en el medio de la tolva con una medida de 150 mm x 200 mm interconectadas hacia la boquilla por medio de un segmento de tubo de 150mmde diámetro. En la base se instalaron los vibradores magnéticos, su utilidad es para proporcionar un método eficaz de obtener el flujo continuo de la ceniza en la tolva por medio de su conicidad. La vibración se obtiene a través de un resorte que flota en el cuerpo sobre el que actúa un poderoso imán electroenergizado por la corriente, la amplitud de la vibración se ajusta por medio de un controlador(ver figura 38).

Figura 38. **Vibradores**



Fuente: Dinamic Engineering Company. *Manual*. p. 6.

3.3.2.2. Sensores

Las boquillas cuentan con 2 sensores cada una, los interruptores de nivel están diseñados para proporcionar el nivel exacto y confiable de los puntos altos y bajos de ceniza acumulada en las tolvas. La electrónica consta de un oscilador, detector y un relé de salida que está controlado por el detector.

Figura 39. **Sensor**



Fuente: Eip Enviro Controls. *Manual*. p.1.

3.3.3. Sistema colector de ceniza

El sistema colector de ceniza fue acoplado un 50 % en el nivel 0 (en tierra) y el otro 50 % en la posición del proceso. Este cuenta con 10 columnas y 80 láminas que cubrirán la parte lateral del precipitador, se colocaron dos columnas en el nivel 0 equidistantes, de tal manera que cumplieran con las dimensiones de las láminas, cada par de columnas lleva 10 láminas. Este proceso se llevó a cabo 4 veces, ya teniendo armada la pared se procedió a levantarlas por medio de la grúa radial, se tensaron con ayuda de cable de 13mm en 4 puntos a lo ancho del precipitador y las paredes que se levantaron primero fueron las de los extremos, teniendo el par de paredes encontradas se unieron por medio de las vigas especiales.

La primera viga se encuentra en el nivel 8,9m hacia arriba y la segunda se instaló en el nivel 20,3m hacia arriba (ver figura 40). Con esto se finalizó el 50% del montaje en esta área, para terminar con el otro porcentaje se procedió a montar las columnas de la parte media del precipitador en ambos lados para luego ir acoplando lámina por lámina hasta cubrir por completo la pared lateral.

Figura 40. **Columnas y vigas del sistema colector de ceniza**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3.3.1. Placas colectoras

A lo largo de las vigas especiales superiores que unen las paredes del precipitador, se instalaron 24 vigas C flotantes que soportarán las 128 placas que atraparán la ceniza. Cada placa se compone de 7 segmentos que fueron ensamblados con la máquina neumática descrita en el capítulo 2, las vigas C flotantes están sujetas con 4 tornillos de 36mm de diámetro y deberán cumplir con el protocolo de instalación (ver figura 41).

Figura 41. Protocolo, de vigas flotantes

PROTOCOLO DE ALINEACIÓN DE LAS VIGAS FLOTANTES

NOMBRE DEL CLIENTE : _____ FECHA : _____
 MODELO PRECIPITADOR: _____
 NUMERO DE ORDEN : _____

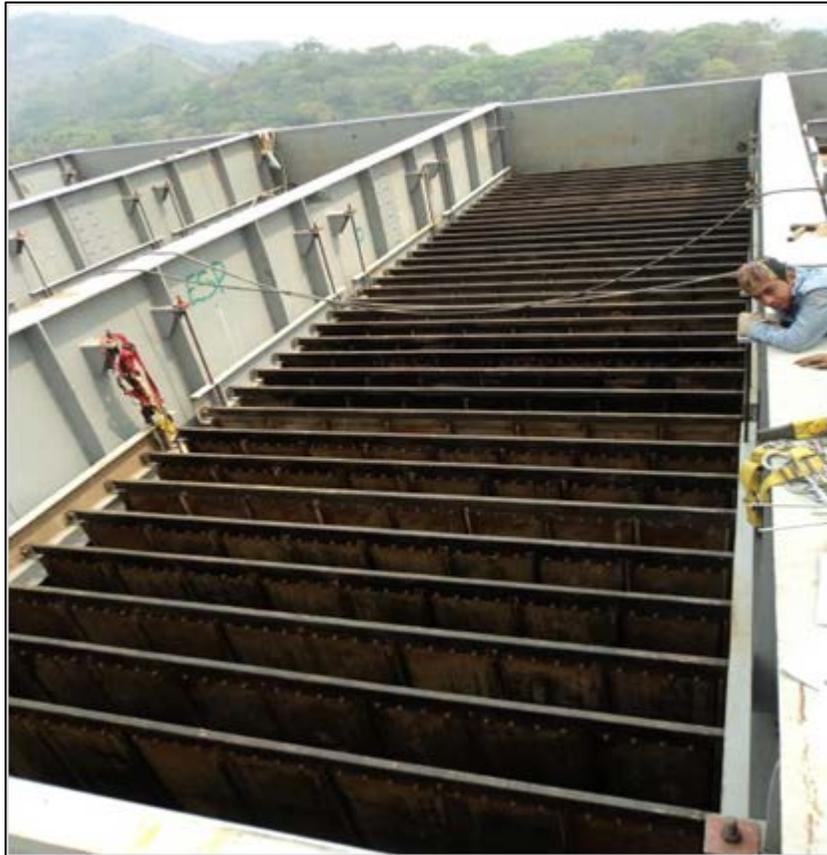
| Dimension | Segun Dibujo | Actual | Observaciones |
|-----------|--------------|--------|---------------|
| P1 - Q2 | | | |
| P2 - Q1 | | | |
| P3 - Q4 | | | |
| P4 - Q3 | | | |
| P5 - Q6 | | | |
| P6 - Q5 | | | |
| P1 - Q6 | | | |
| P6 - Q1 | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Contractor Name: _____ Clyde Bergemann India Pvt. Ltd
 Signature: _____ Name: _____
 Client Name: _____
 Signature: _____

Fuente: Clyde Bergemann. *Manual* p. 52.

Los 7 segmentos de la placa fueron unidos en sus extremos a través de piezas en forma de U y tornillos de 12mm de ancho. Las piezas en forma de U en sus extremos longitudinales tienen agujeros para ser instaladas en las vigas flotantes (ver figura 42). La placa del precipitador se instaló en su área de recolección de ceniza, para esto fue necesario fabricar una plataforma de vigas C de 150 mm y así elevar por medio de la grúa hasta su punto de trabajo (ver figura 43).

Figura 42. **Placa colectora en posición de trabajo**



Fuente: Ingenio La Unión.

Figura 43. **Plataforma para placas colectoras**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3.3.2. Electrodo emisores del campo eléctrico

Los electrodos están instalados en un par de vigas C encontradas de 200 mm que cubren todo el ancho del precipitador. En cada campo se instalaron 4 pares de vigas que sostendrán los 302 electrodos por campo. Las vigas C encontradas están sujetas por medio de 10 segmentos de vigas C de 100mm alineadas perfectamente con un par de vigas C de 200mm por medio de angulares (ver figura 44) y así poder colocarlos en la parte media de cada segmento de las placa colectoras, formando una distancia equidistante de placa a placa y de electrodo a electrodo. Para lograr instalar los electrodos en el punto fue necesario fabricar una plataforma (ver figura 45), trasladarlos por medio de grúa e introducirlos por la parte de arriba del precipitador.

Antes de introducir los electrodos fue necesario limpiar, revisar, alinear y lubricar con aceite Rustilo DWX 32 los electrodos, debido a que estos deberán estar almacenados sin ser utilizados por aproximadamente 5 meses más hasta el momento del arranque del equipo.

Figura 44. **Posición de electrodos**



Fuente: Ingenio La Unión.

Figura 45. **Sistema para instalación de electrodos**



Fuente: Ingenio La Unión.

Los electrodos miden 11,5m y en la parte de abajo llevan una armazón que separará uniformemente los electrodos y ayudará a mantenerlos alineados adecuadamente (ver figura 46). Cada estructura alinea 28 electrodos y cada uno de estos segmentos son unidos lateralmente con platinas. Este conjunto de estructuras son sujetadas a 2 extremos contrarios por medio de un mecanismo de alineación, con el objetivo de alinear perfectamente todos los electrodos del campo, dicha armazón fue introducida por los registros de las tolvas de descarga de ceniza.

Figura 46. **Alineación parte baja de los electrodos**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3.4. Boquillas de entrada y salida de gases

Las boquillas se armaron en el nivel 0, fueron sujetadas con soportes provisionales, utilizando para su montaje un *telehandler* para ir uniendo las láminas y así darle su forma de diseño de fábrica (ver figura 47). Las piezas contienen vigas C que varían su dimensión según se avanza hacia la parte más grande de la boquilla. En la parte pequeña de la boquilla se instalaron las juntas expansivas que absorberán el movimiento que tendrá el precipitador.

Figura 47. **Boquilla ensamblada en nivel 0**



Fuente: Ingenio La Unión.

Cada una de las boquillas tiene un peso aproximado de 27 tons, la boquilla de entrada contiene tres segmentos de láminas perforadas que tienen como función la distribución de los gases dentro del precipitador, por lo tanto, la boquilla de entrada tiene más peso que la de la salida. La boquilla de salida únicamente cuenta con una lámina perforada distribuidora de gases en la parte más grande del cono, este sistema de distribución de gases se instaló en el nivel 0.

Para instalar las boquillas en el punto de trabajo, fue necesaria la grúa de 60 tons. Se sujetó de tres puntos en la parte alta o techo de la boquilla, dos de los puntos se colocaron equidistantes y fijos, es decir, con estrobos del mismo tamaño, mientras que en el tercer punto se utilizó un polipasto de 10 tons y con

esto se logró colocarlas a nivel en la entrada y salida del área de recolección de ceniza (ver figura 48).

Figura 48. **Montaje de boquillas**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3.5. Estructura para los transformadores

Las vigas que se utilizaron en el montaje de este segmento ya fueron detalladas en el capítulo anterior, vigas pequeñas pero importantes para trasladar los transformadores al nivel 0 en el momento de alguna reparación o sustitución. Para su montaje fue necesario utilizar la grúa de 80 toneladas debido a la ubicación, esta grúa proporcionó el brazo o altura necesaria.

Se instalaron primero las vigas C tipo caja para después continuar con los amarres, la estructura cuenta con una viga guía para el puente grúa (ver figura 49), este está direccionado al lado izquierdo del precipitador y así bajar los TR principalmente u otros materiales que sean necesarios (martillos eléctricos, cables, entre otros).

Figura 49. **Estructura para TR**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3.5.1. Transformadores

Elemento primordial del precipitador que alimentará a los electrodos y placas colectoras con un voltaje en corriente directa para producir el campo electromagnético y cargar negativamente el hollín proveniente de los gases de combustión de la caldera No.8. Los transformadores se colocaron en la parte más alta del precipitador con ayuda de la grúa de 80 tons y únicamente son

montados sobre dos rieles vigas C con topes provisionales para asegurarlos (ver figura 50).

Figura 50. **Transformadores**



Fuente: Ingenio La Unión.

3.3.6. Sistema de aislamiento eléctrico

El precipitador trabaja con alto voltaje en corriente directa, viene diseñado con un sistema de aislamiento y al mismo tiempo la función de actuar como soporte del conjunto de los electrodos emisores (ver figura 51).

Figura 51. **Sistema de soporte y aislamiento**



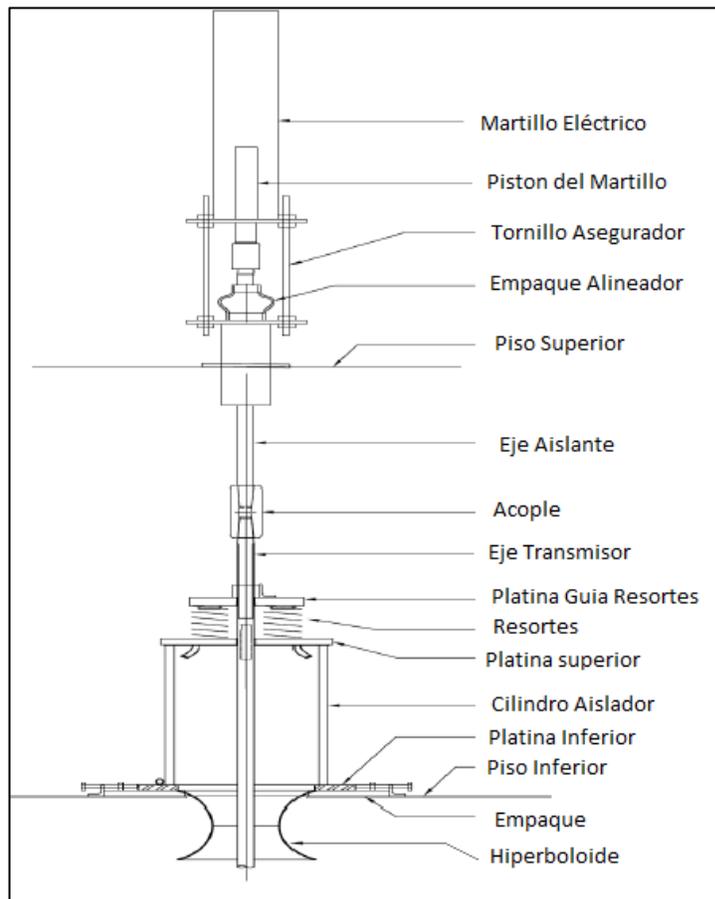
Fuente: Ingenio La Unión.

El precipitador cuenta con cuatro campos y en cada campo tiene cuatro juegos de aislamiento eléctrico. La pieza principales un cilindro de cerámica de 22plg de diámetro (ver figura 51), este cilindro está sobre dos empaques de hierro de dos diámetros distintos y grosores de $\frac{3}{4}$ plg, a su vez estos tienen asbesto y silicón para evitar que haya contacto con el gas y el área aislada. En la parte interna tiene una pieza en forma de hiperboloide, que es un protector del eje transmisor de la vibración y del voltaje. En la parte alta del cilindro cuenta con una platina circular de $\frac{3}{4}$ plg que servirá como conexión del voltaje proveniente del TR.

Esta platina también tiene la función de amortiguar el peso por medio de tres resortes y una segunda platina aseguradora de los mismos. Esta segunda platina está sujeta con una tuerca con el eje de 2plg, eje que tiene un acople

hacia los martillos eléctricos, los cuales cuentan también con aislamiento (ver figura 52). El montaje se llevó a cabo con el debido cuidado para dejar todo perfectamente centrado y alineado.

Figura 52. **Corte transversal**



Fuente: Clyde Bergemann. *Manual*. p. 78.

3.3.7. **Vibradores de placas colectoras y electrodos emisores**

Básicamente, los vibradores o martillos eléctricos de las placas colectoras y electrodos emisores son iguales (ver figura 53), la única diferencia que existe

entre ambos es que los vibradores de los electrodos emisores tienen un eje de poliuretano que tiene como función aislar el alto voltaje de corriente directa. El precipitador cuenta con 86 vibradores, 16 de ellos son de los electrodos emisores, 67 son de las placas colectoras y 3 son de las láminas perforadas distribuidoras que están es las boquillas de entrada y salida de los gases.

Figura 53. **Martillo eléctrico**



Fuente: Ingenio La Unión.

Para la instalación de los vibradores, únicamente bastó con utilizar el plomo nivel y metro para dejarlos en la posición correcta. Para asegurar un buen funcionamiento, es importante poner atención que el eje trasmisor de la

vibración no tenga contacto con ningún otro elemento del precipitador, debido a que esto produciría un desgaste excesivo en las piezas o una mala transmisión de la vibración y, en consecuencia, la ceniza atrapada no podrá precipitarse en su totalidad o bien de la forma adecuada.

4. MANTENIMIENTO DEL PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO

Para hacer realidad los objetivos que se persiguen, es necesario seguir lineamientos y conservar el equipo por medio de la identificación de puntos críticos de la maquinaria.

4.1. Concepto general de mantenimiento

El mantenimiento se puede definir como las actividades que se deben de llevar a cabo con el propósito de conservar el equipo, instalaciones, herramientas y otros en condiciones de función segura, para que tal equipo sea eficiente y al mismo tiempo debe involucrarse el área administrativa para lograr un mantenimiento económico para la empresa. Debe buscarse siempre el punto de equilibrio en el mantenimiento, tal equilibrio va relacionado con la producción, por lo tanto es de importancia ir implementando nuevos planes de mantenimiento.

El mantenimiento en la industria azucarera está dividido en dos partes que incluyen normas o métodos que regulan cada uno de los pasos durante el tiempo de zafra y no zafra.

4.2. Tipos de mantenimiento

Conocer más a fondo sobre el diseño, funcionamiento, estructura y material de los equipos que comprende la maquinaria a través de manuales, libros, técnicos, entre otros, es de vital importancia y ayuda a dar comienzo al

diseño del programa de organización, planificación y ejecución del mantenimiento.

En el montaje es necesario recabar toda la información para ser utilizada en la creación de actividades de mantenimiento. El conocimiento de los equipos crecerá a través del tiempo, indicando los puntos críticos, ubicados, se podrán tomar decisiones que resolverán o evitarán los inconvenientes que puedan surgir en el arranque o en proceso. Definitivamente, con esto se tiene como objetivo minimizar la cantidad de paros por fallas de la maquinaria en el momento que esta se encuentre en proceso.

El mantenimiento puede ser de varias clases: correctivo, planificado, programado, organizado, preventivo y predictivo. El sistema a seguir según la necesidad o planificación deberá permitir controlar y verificar la ejecución de las actividades, por lo tanto, es necesario organizar sistemáticamente la aplicación del mantenimiento.

4.2.1. Correctivo

El mantenimiento correctivo se lleva a cabo en el momento en el que se presentan las fallas no esperadas, debido normalmente a la ausencia de control del equipo.

Este tipo de mantenimiento tiene su base en la interrupción de la maquinaria en producción, se espera que el equipo ya no funcione adecuadamente para intervenir en la reparación e implementar el mantenimiento correctivo, este tipo de acción deberá minimizarse ya que acarrea costos elevados.

El objetivo de un departamento de mantenimiento es el de tener bajo su control los puntos críticos de la maquinaria y garantizar la funcionalidad del mismo sin incurrir en gastos superfluos, por lo tanto, dicho mantenimiento representa altos costos y provocaría el colapso del equipo si solo se aplicará este.

4.2.2. Planificado

Este tipo de mantenimiento representa una preparación anticipada del equipo, material y personal para realizar los trabajos de mantenimiento. Está enfocado principalmente a procedimientos de índole administrativo con la finalidad de obtener una disponibilidad en el momento que se requiera del equipo, material y personal.

4.2.3. Programado

El funcionamiento debe garantizarse y prolongar el tiempo de producción, para garantizarlo, es necesario la inspección y el monitoreo constante a elementos específicos de la maquinaria. Los elementos específicos son los que producen el mantenimiento programado por medio de la creación de rutinas de mantenimiento preventivo. El fabricante, por medio de manuales o información técnica directa, recomienda en qué condiciones adecuadas de trabajo deberá funcionar la maquinaria, es decir, nos indicarán rangos de operación, inspecciones que se deben realizar y frecuencias.

Es de importancia mencionar que se deberá, según la necesidad lo permita, incrementar actividades con la finalidad de ascender en la eficiencia de la programación del mantenimiento para beneficio del equipo.

4.2.4. Organizado

Es necesario estructurar la realización de los procedimientos previamente programados, estos se guiarán por medio de los métodos de trabajo previamente estudiados hacia la secuencia óptima con respecto a tiempo y costos. Para lograr la mejor manera de realizar una actividad, deberá realizarse un buena planificación y programación.

4.2.5. Preventivo

Es la unión de los datos y procedimientos recabados en los mantenimientos organizado y planificado. Con la unión de estos dos sistemas se pretende encontrar técnicas que provoquen una disminución en la realización del mantenimiento correctivo. Al llevar a cabo el mantenimiento correctivo este repercute directamente en la producción de la fábrica y el costo del mismo, básicamente al Departamento de Generación.

4.2.6. Predictivo

Este tipo de mantenimiento se emplea con el objetivo de anticiparse a la falla de algunos elementos específicos de la maquinaria. Para lograr este objetivo se deberá utilizar instrumentación de alta tecnología, sin dejar por un lado la optimización de los recursos económicos, debido a que la utilización continua de este tipo de mantenimiento podría elevar el costo del Departamento de Mantenimiento.

Para la efectividad de este tipo de mantenimiento conviene tener la información detallada de las actividades efectuadas, en donde se haga constar

un registro completo de la máquina de las actividades en el tiempo y así interpretar el comportamiento de los elementos y estimar su vida útil.

4.3. Programas de actividades de mantenimiento

Luego de conocer los diferentes conceptos que abarca la palabra mantenimiento, debe tenerse claro que el conjunto de actividades para lograr que el sistema que se implementó sea eficiente, por lo tanto, deben tener un fin común que es el de conservar el equipo en condiciones de función segura y que sea eficiente y a un bajo costo.

Debido a que el ESP tiene como objetivo atrapar las partículas que contaminan el ambiente, es de vital importancia crear el programa de actividades de mantenimiento y generando las siguientes ventajas:

- El equipo se conserva en óptimas condiciones
- Se reduce la cantidad de contaminantes en el ambiente
- Se disminuyen paradas imprevistas
- Se disminuyen las reparaciones costosas (tiempo, materia, entre otros)
- Reducción de horas extras de trabajo

Las actividades básicas que representa a un programa de mantenimiento son los siguientes:

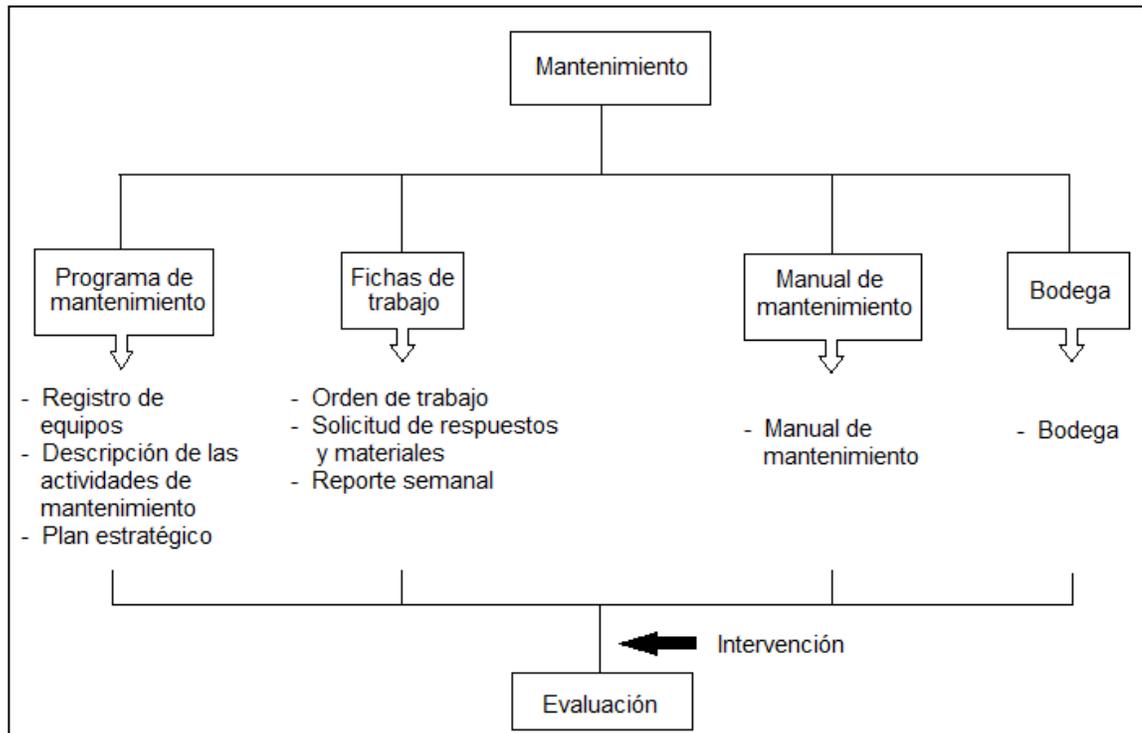
- Inspección: es el método de verificación periódica de la estructura, equipo crítico y otros, esta actividad tiene como finalidad detectar condiciones que puedan provocar una interrupción en el buen funcionamiento del equipo o alguna desgaste excesivo.

- Servicio: es la realización de rutinas orientadas a conservar el equipo en óptimas condiciones de funcionamiento y con esto prevenir desperfectos grandes que representarían un alto costo. Dentro de las rutinas se pueden mencionar las siguientes: lubricación, limpieza, ajustes reemplazos, entre otras.
- Reparaciones: es el arreglo inmediato de partes dañadas o con exceso de desgaste, esto puede llegar hasta el reemplazo. Deberán ser identificadas por medio de las inspecciones o en el momento de alguna interrupción en la operación del Ingenio, con el objetivo de mantenerlo en buenas condiciones y en óptimo funcionamiento.
- Modificación: es la alteración que se puede realizar en el diseño original y que no afecte a sus características principales. Las modificaciones podría ser en algún equipo, estructura, entre otros, con el fin de reducir costos y aumentar la eficiencia.
- Sustitución: esta actividad representa un cambio parcial o total de algunos equipos, esta determinación deberá tomarse en el momento en que las unidades se hayan vuelto obsoletas y que por lo tanto estarán provocando ineficiencia y altos costos por mantenimiento.

4.4. Elaboración del plan de mantenimiento

Se propondrá la implementación del programa de mantenimiento preventivo, para lo cual se deberá cumplir con la siguiente organización.

Figura 54. Organización del plan de mantenimiento



Fuente: elaboración propia.

4.4.1. Programa de mantenimiento

Se debe garantizar la instalación para atender el programa de disponibilidad del ESP, las actividades y estrategias deberán estar destinadas para prevenir daños y asegurar que los costos a utilizar sean los adecuados.

4.4.1.1. Registro de equipos

La identificación del equipo deberá elaborarse por medio de fichas, las cuales contendrán información específica que ayudará a realizar los trabajos correspondientes, pedidos de material y así obtener una idea del equipo. En el

Ingenio La Unión se realizó la implementación de SAP (sistema, aplicaciones y productos), sistema que ayuda en el área de mantenimiento a identificar los equipos, ingresar información técnica y realizar pedidos entre otros beneficios. Como primer paso, se introdujo el equipo como unidad y luego se crearán subgrupos (ver figura 55), con el objetivo de tener una ubicación técnica dentro del sistema, se deberán seguir los lineamientos estructurales de SAP.

Figura 55. Estructuración del equipo en el sistema

Lista Tratar Pasar a Detalles Entorno Opciones Sistema Ayuda

Repr.estructura ubicación técnica: Lista de estructura

Ubic.téc. P Válido de 28.04.2015

Denominación INGENIO LA UNION

| Ubic.téc. | Denominación | Descripción |
|-------------------|--|-------------|
| P-002-012-069 | CALDERA 8 (IJT) | |
| P-002-012-069-516 | ALIMENTACION DE AIRE | |
| P-002-012-069-517 | EXTRACCION DE GASES | |
| P-002-012-069-518 | ALIMENTACION DE BAGAZO | |
| P-002-012-069-519 | ALIMENTACION DE CARBON | |
| P-002-012-069-520 | ALIMENTACION DE AGUA | |
| P-002-012-069-521 | TRATAMIENTO QUIMICO | |
| P-002-012-069-522 | OSMOSIS INVERSA | |
| P-002-012-069-523 | TRANSFERENCIA DE CALOR (HOGAR) | |
| P-002-012-069-524 | PRODUCCION DE VAPOR | |
| P-002-012-069-525 | CABEZALES DE VAPOR | |
| P-002-012-069-526 | RECUPERACION DE CALOR | |
| P-002-012-069-527 | SISTEMA DE EXTRACCION DE CENIZAS (FLY AS | |
| P-002-012-069-528 | SISTEMA DE EXTRACCION DE CENIZA HUMEDA | |
| P-002-012-069-529 | PRECIPITADOR ELECTROSTATICO (ESP) | |
| 105103 | PRECIPITADOR ELECTROSTATICO | |
| 105115 | PUENTE GRUA ESP | |
| 105120 | CALENTADOR ELECTRICO ESP | |
| 105152 | MCC 4 ESP | |
| 105295 | MOTOR VENTILADOR ESP | |
| 105361 | TABLERO CONTROL TRAF0 1 ESP | |
| 105362 | TABLERO CONTROL TRAF0 2 ESP | |
| 105363 | TABLERO CONTROL TRAF0 3 ESP | |
| 105364 | TABLERO CONTROL TRAF0 4 ESP | |
| 105365 | SISTEMA RAPPER ESP | |
| 105438 | TRANSFORMADOR 1 ESP | |
| 105439 | TRANSFORMADOR 2 ESP | |
| 105440 | TRANSFORMADOR 3 ESP | |
| 105441 | TRANSFORMADOR 4 ESP | |
| 105493 | VENTILADOR ESP C8 | |
| 145193 | TBC 1220 X 610 X 2285 | |
| 145207 | TBC 600 X 250 X 750 | |
| 145208 | TBC 400 X 250 X 550 | |
| 145209 | TBC 600 X 250 X 750 | |
| 145210 | TBC 400 X 250 X 550 | |
| 145211 | TBC 600 X 250 X 750 | |
| 145212 | TBC 400 X 250 X 550 | |
| 145213 | TBC 600 X 250 X 750 | |
| 145214 | TBC 400 X 250 X 550 | |
| 145241 | SEN PYRO/ALLIED TIPO K | |
| 145267 | SEN BTC 12-038 | |

SAP

Fuente: sistema SAP, Ingenio la Unión.

Se propondrán subgrupos de los equipos que deberían ingresar en el sistema SAP.

- Martillo eléctrico
- Transformadores
- Puertas de acceso
- Juntas de expansión
- Sistema de aislamiento eléctrico
- Motor de ventilación para el sistema de aislamiento eléctrico
- Sistema colector de ceniza
- Boquillas de entrada y salida de gases
- Boquillas de salida de ceniza
- Estructura de los elementos eléctricos

4.4.1.2. Descripción de las actividades de mantenimiento

Al equipo o sistema se le asignará las actividades de mantenimiento con la finalidad de disminuir los problemas más frecuente que provoquen un disparo total o un mal funcionamiento del equipo.

4.4.1.3. Plan estratégico

Se controlará por medio de una ficha de seguimiento que nos indica específicamente las actividades que se realizarán en forma diaria durante un tiempo específico, este tiempo se definirá por indicaciones de técnicos especialista del ESP de Clyde Bergemann.

4.4.2. Fichas de trabajo

La elaboración de fichas de trabajo se realizará con la finalidad de que en el programa de mantenimiento se cumplan con las actividades. En la fichas se deberá incluir las órdenes, los materiales y repuestos, estos datos servirán para el historial del equipo y, al mismo tiempo, se retroalimentará el programa de mantenimiento SAP.

4.4.2.1. Orden de trabajo

Las órdenes de trabajo serán solicitadas por el jefe de turno y aprobadas por el ingeniero de mantenimiento. El tipo de orden dependerá de la información del plan estratégico, este plan especificará las reparaciones, cambios y emergencias.

Ningún trabajo deberá iniciarse si no existe la respectiva orden, deben cumplirse las condiciones mínimas para elaborar los trabajos, serán verificadas personalmente por el encargado y tendrán la siguiente prioridad:

- Emergencia
- Urgente
- Normal
- Permanente

4.4.2.2. Solicitud de repuestos y materiales

Este tipo de solicitud servirá para proveer de materiales y repuestos al equipo encargado de realizar el mantenimiento al ESP, el material deberá estar en bodega, por sugerencia del fabricante o experiencia del personal.

4.4.2.3. Reporte semanal de mantenimiento

Los reportes servirán para registrar los servicios que se efectuaron durante la semana, con esta acción se persigue llevar un control de los trabajos efectuados y el costo que representa la utilización de los repuestos y materiales a partir de las órdenes de trabajo.

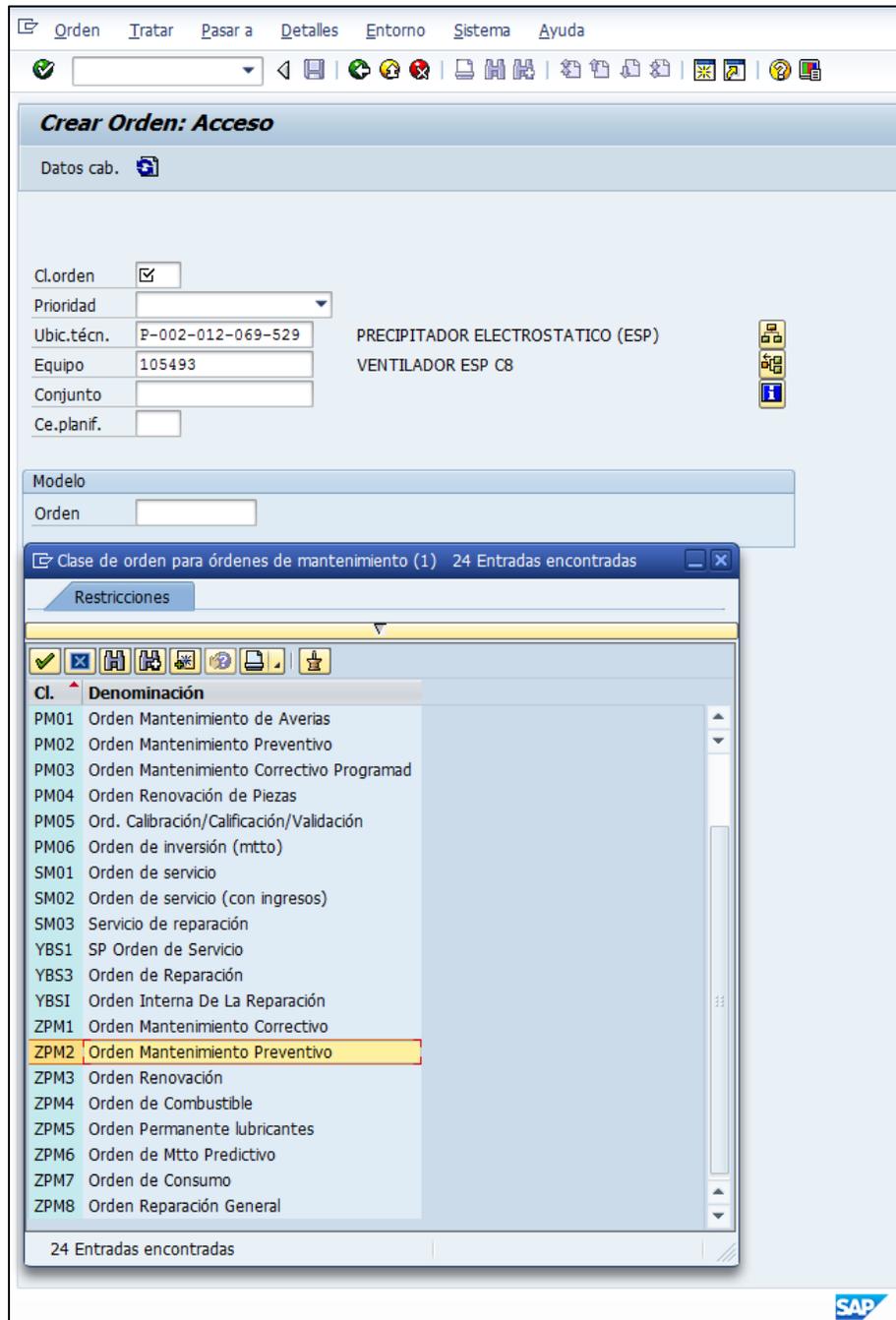
4.4.3. Manual de mantenimiento

Se deberá realizar un manual de mantenimiento que contenga las instrucciones organizadas. Dicha información se redactará a partir de los manuales de fabricantes (para equipos dedicados del ESP) e información técnica de los equipos comunes (motores, chumaceras, sellos, entre otros). La información técnica podrá obtenerse por medio de las empresas que proporcionan el material o vía internet, si esto no fuera posible, se acudirá a técnicos capacitados por la Clyde Bergemann.

4.4.4. Bodega

¿Qué se debe tener en existencia? ¿Cuándo hacer un pedido de repuestos y codificarlos para su uso?, al cumplir con estas preguntas se garantiza el abastecimiento en el momento de necesitarlo. Para ello, se elaborará la ficha electrónica en SAP de las órdenes de mantenimiento (ver figura 56), luego de esto pueden realizar los pedidos del material para tener un registro y tener en control los materiales que servirán en el momento de procesar el plan estratégico.

Figura 56. Cuadro de órdenes de mantenimiento



Fuente: sistema SAP, Ingenio la Unión.

4.5. Mantenimiento en época de reparación

El mantenimiento en época de reparación se ejecuta en época lluviosa, temporada que dura aproximadamente seis meses. En este periodo deberán implementarse los mantenimientos planificado, programado y organizado, que básicamente es la implementación del mantenimiento preventivo. El buen procedimiento y ejecución evitará la utilización del mantenimiento predictivo en época productiva y minimizará el correctivo.

4.6. Mantenimiento en época de zafra

Debido a la magnitud de esta industria por capacidad de producción y la limitante que se tiene con respecto al tiempo de cosecha, ligado a las temporadas de tiempo seco y tiempo húmedo en la geografía del país, los equipos que ofrecen los proveedores son diseñados para trabajar durante periodos largos. Sin embargo, por requerimientos del equipo y limitantes en materiales de diseño, se deberán realizar mantenimientos preventivos y predictivos con el objetivo de garantizar un buen funcionamiento del equipo. El mantenimiento preventivo en esta época se deberá coordinar, si es posible, con las paradas programadas en molinos de fábrica, para que no afecte en la producción. El mantenimiento en esta época deberá ser mínimo y esto se logrará realizando un buen mantenimiento en época de reparación.

5. CONTROLES DE LOS INDICADORES DE MANTENIMIENTO

Los indicadores en cada área de cualquier proceso son de vital importancia, debido a que indican los parámetros que se deben controlar para obtener los mejores resultados. En el área de mantenimiento existe mucha preocupación sobre cuáles debieran de ser los indicadores a medir.

El precipitador electrostático interesa que esté siempre funcionando, debido a que el objetivo de este es el de captar la ceniza proveniente de la combustión de la quema de bagazo o carbón, en el momento que no esté trabajando el ESP, por algún desperfecto, implicaría contaminación al medio ambiente.

Los indicadores que deberán implementarse para controlar el funcionamiento constante del precipitador en el tiempo de zafra, podrían ser los siguientes: disponibilidad, gestión de órdenes de trabajo, proporción de tipo de mantenimiento. Los indicadores irán proporcionando información importante para ir mejorando y tomar las mejores decisiones. Es de importancia mencionar que se deberán adaptar según el requerimiento.

5.1. Indicadores de disponibilidad

Estos indicadores proporcionarán la información de disponibilidad del equipo a través de la variable tiempo y con los tiempos medios entre fallas y reparación, existe una proporcionalidad inversa con respecto a la cantidad de averías.

5.1.1. Disponibilidad total

En mantenimiento es el indicador más importante, es fácil de calcular y tiene la desventaja que se manipula. El ESP cuenta con un conjunto de equipo, sin embargo, para el cálculo de este indicador se tomará como uno solo, si se calcula correctamente, es sencillo:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{horas totales} - \text{horas paradas por mantenimiento}}{\text{horas totales}}$$

5.1.2. Disponibilidad por averías

En este indicador, a diferencia del anterior, se están tomando en cuenta las horas paradas por mantenimiento programado, aquí se colocan las horas por intervención no programadas (es decir, mantenimiento correctivo). Se deberá trabajar para que este indicador sea lo más bajo posible, la fórmula es la siguiente:

$$\text{Disponibilidad por avería} = \frac{\text{horas totales} - \text{horas de parada por avería}}{\text{horas totales}}$$

5.1.3. Tiempo medio entre fallas

Por sus siglas en inglés es conocido como MTBF, este dato permite conocer la frecuencia con que suceden las averías, su fórmula es la siguiente:

$$\text{MTBF} = \frac{\text{núm. de horas totales del periodo de tiempo analizado}}{\text{núm. de averías}}$$

5.1.4. Tiempo medio de reparación

Conocido por sus siglas en inglés como MTTR, este dato da a conocer la importancia que se le debe dar a las averías que se presentan en el equipo, considerando el tiempo que se utilice para darle solución, y así tomar las acciones correspondientes para disminuir los tiempos, la fórmula es la siguiente:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{núm. de horas de paro por avería}}{\text{núm. de averías}}$$

5.2. Indicadores de gestión de órdenes de trabajo

En este tipo de indicadores se tiene una relación proporcional a las cantidades de órdenes generadas, finalizadas, pendientes y de emergencia, por supuesto, con respecto a tiempo. Esto, con la finalidad de controlar que se cumpla con lo planificado y determinar los puntos débiles de la planificación, ejecución o control.

5.2.1. Órdenes de trabajo generadas en un tiempo determinado

Este es un indicador muy fiable y utilizado en todas las plantas de proceso, es más representativo cuando es grande la cantidad de órdenes de trabajo (O.T.):

$$\text{O.T. generadas} = \frac{\text{O.T.}}{\text{tiempo}}$$

5.2.2. Órdenes de trabajo finalizadas

Se debe considerar hacerlo siempre respecto a un tiempo determinado, es de importancia conocer cuál es el número de órdenes de trabajo finalizadas en relación al número de órdenes generadas.

$$\text{O.T. finalizadas} = \frac{\text{O.T. generadas} - \text{O.T. pendientes}}{\text{tiempo}}$$

5.2.3. Órdenes de trabajo pendientes

La eficacia en la solución de problemas es de importancia, deberá tenerse cuidado en distinguir entre la O.T. que están pendientes por causas ajenas al Departamento de Mantenimiento. Para tener un dato más real, es conveniente dividir este indicador entre la sumatoria de las siguiente posibles causas que mantenga la O.T. en pendiente, por repuestos, por parada de algún otro equipo, otras causas.

$$\text{O.T. pendientes} = \frac{\text{O.T. pendiente}}{\text{sumatoria otras causas}}$$

Este dato indicará si existe una mala organización de mantenimiento debido a la acumulación de tareas.

5.2.4. Órdenes de trabajo de emergencia

La cantidad de órdenes de trabajo de emergencia generadas en un tiempo determinado es una referencia que indica el estado en el que se encuentra la planta o el equipo, lo que se busca es que esta cantidad de

órdenes sean lo más la mínima posible. Cuando las órdenes son demasiadas, se podrá concluir que las condiciones de la planta o equipo son deficientes. Es importante tener en cuenta que dicho parámetro deberá compararse con respecto a otros periodos y observar su evolución.

5.2.5. Horas estimadas de trabajo pendiente

Esta variable a estudiar es considerada más importante que el número de órdenes pendientes, da a conocer la carga de trabajo estimada que hace falta por realizar y es la suma de las horas en cada trabajo pendiente.

5.2.6. Índice de cumplimiento de la planificación

Este índice mide el grado de acierto de la planificación, es la proporción de órdenes terminadas en o antes de la fecha planificada, dividido el total de órdenes.

Índice de cumplimiento de la planificación =
$$\frac{\text{núm. órdenes terminadas en fecha}}{\text{órdenes totales}}$$

5.2.7. Desviación media del tiempo planificado

Cada hora de atraso de entrega de algún proyecto o trabajo que ha sido planificado representa una elevación en su costo, por lo tanto, este indicador es de vital importancia. Existen dos casos de medición de la desviación media del tiempo planificado:

- Desviación media sobre el momento de finalización, que consiste en la sumatoria de las horas atrasadas de cada orden de trabajo en un tiempo

determinado (semana, mes, tiempo de no zafra) dividido el número de órdenes de trabajo.

$$\text{Desviación media fin} = \frac{\sum \text{horas de retraso de cada orden de trabajo}}{\text{núm. de órdenes de trabajo}}$$

- Desviación media de las horas/hombre empleadas en una O.T. dividido número de órdenes de trabajo.

$$\text{Desviación media horas hombre} = \frac{\sum \text{incremento de horas/hombre O.T.}}{\text{núm. de órdenes de trabajo}}$$

5.3. Indicadores de proporción de tipo de mantenimiento

Definitivamente, el tiempo utilizado en cualquier proceso es una variable importante, los indicadores a continuación descritos proporcionan información del tiempo que se está utilizando en los distintos tipos de mantenimiento anteriormente descritos.

5.3.1. Índice de mantenimiento programado

Conocido por sus siglas en español IMP, este indica el porcentaje de las horas invertidas en mantenimiento y es el cociente de las horas dedicadas a mantenimiento programado y las horas totales.

$$\text{IMP} = \frac{\text{horas dedicadas a mantenimiento programado}}{\text{horas totales dedicadas a mantenimiento}}$$

5.3.2. Índice de mantenimiento correctivo

Este índice es de vital importancia, ya que proporciona información sobre el porcentaje de tiempo que se utiliza para corregir la falla y que, por lo tanto, el equipo está dejando de producir.

$$\text{IMC} = \frac{\text{horas dedicadas a mantenimiento correctivo}}{\text{horas totales dedicadas a mantenimiento}}$$

El dato de este índice puede ser utilizado para la aprobación en la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en donde no exista, y si existe, es de utilidad para realizar cambios en el departamento de mantenimiento. Con este índice también se puede evaluar el desempeño de un contratista.

5.3.3. Índice de emergencia

Dentro de las plantas siempre existen puntos críticos, por lo tanto, en el momento de alguna falla en estos puntos se deberán generar órdenes de prioridad máxima. Sin embargo, se deben mantener bajas las órdenes de trabajo de emergencia, con esto se logra una buena gestión en el mantenimiento, si existe un buen plan de mantenimiento preventivo este tipo de órdenes será bajo.

$$\text{IME} = \frac{\text{horas O.T. prioridad máxima}}{\text{horas totales de mantenimiento}}$$

5.4. Tiempo de reparación

El tiempo que se utilice o programe para la reparación es de vital importancia tenerlo bajo control, es un objetivo primordial y es independiente del tipo de mantenimiento que se realice. El tipo de mantenimiento dependerá de alguna manera de la temporada en la que se encuentre el Ingenio y básicamente de la necesidad debido al tipo de avería o reparación que se presente específicamente en tiempo de zafra, ya que en tiempo de reparación este tema deberá estar controlado en su totalidad.

5.4.1. Tiempo de reparación en zafra

En zafra, básicamente, se persigue que el precipitador trabaje las 24 horas del día durante 6 meses que dura la zafra, pero en el tiempo de zafra existen paradas programadas para realizar mantenimientos preventivos en fábrica, tiempo que se debe aprovechar para programar los mantenimientos de la misma índole para el ESP. También existen las averías o fallas que surgen en el tiempo de producción, estas son las que causan mayores pérdidas y que deben resolverse en el menor tiempo posible. El tipo de mantenimiento que se implementa es el correctivo, mantenimiento que representa un alto costo para el Departamento, debido a que esto es por colapso de máquina y para su corrección no deberá escatimarse ningún esfuerzo material y humano.

5.4.2. Tiempo de reparación fuera de zafra

El equipo básicamente necesita de un tiempo determinado para realizar una reparación más detallada, este tipo de reparación se programará en el tiempo muerto en el Ingenio, que es el de fuera de zafra. En esta época se

cuenta con más tiempo para poder realizar los cambios, reparaciones e inspección interna del ESP.

5.5. Rutinas de inspección

La inspección que se realiza en el ESP es importante debido a que esto proporcionará información para tomar decisiones anticipadas a una posible falla de algún equipo o segmento del ESP.

Las rutinas de inspección varían según sea el tiempo en el cual se está realizando, no es lo mismo inspeccionar en tiempo de zafra que en tiempo fuera de zafra.

5.6. Historial del equipo

Se tendrá un libro de actas para llevar un control de los equipos y se llenarán las fichas de control, con el objetivo de tener información aproximada de la vida útil de los equipos.

CONCLUSIONES

1. Se describieron los componentes mecánicos del lavador en seco precipitador electroestático. Para una mayor comprensión, la estructura se dividió en 4 partes importantes que se describieron de forma ascendente (de abajo hacia arriba), para llevar un orden y así ubicar los elementos dentro de la máquina más fácilmente.
2. Por ser un equipo alto en peso, el Ingenio La Unión contrató una empresa especializada en el análisis de tierra, para así garantizar la buena capacidad de los suelos. La estructura está soportada por diez zapatas que debieron ser inspeccionadas constantemente para obtener una excelente alineación. Para el montaje del equipo fue necesario contar con maquinaria pesada para la elevación de los elementos, respetándose los protocolos de montaje proporcionados por la empresa diseñadora del precipitador. Se respetó la programación del montaje elaborada por un equipo de ingenieros a través de Microsoft Project, para así cumplir con las fechas de entrega.
3. En el área mecánica, los elementos de mayor importancia del precipitador electroestático que efectúan el trabajo esencial son los electrodos emisores y placas recolectoras de la ceniza. Esta recolección se logra por el diferencial de potencial al cual son sometidos los elementos antes mencionados. Los parámetros de diseño del precipitador se acoplarán a las características técnicas de la caldera, con el objetivo de alargar la vida útil del precipitador y obtener la eficiencia de diseño.

4. Los indicadores que se proponen como guía para el control del funcionamiento constante del precipitador son los siguientes: de disponibilidad, de gestión de órdenes de trabajo y de proporción de tipo de mantenimiento.

5. La interrupción en el funcionamiento del precipitador indicará qué se debe corregir, a través del mantenimiento correctivo, el cual eleva el costo. Por lo tanto, por medio de la implementación de un programa de mantenimiento se podrán identificar los puntos críticos en proceso (fugas a través de toda la máquina, en especial en el sistema de aislamiento eléctrico, desalineación de los elementos del campo colector, martillos eléctricos, obstrucción de las pantallas distribuidoras de gases y desalojamiento de la ceniza). En el montaje se pudo observar que hay equipo de alta dificultad para su reparación, alineación o cambio (electrodos emisores, placas recolectoras, TR), por lo tanto, en tiempo de reparación, estos puntos serán los críticos por el factor tiempo y mano de obra.

RECOMENDACIONES

1. Asegurarse, antes de la puesta en marcha del precipitador electrostático, que los componentes se encuentren en buenas condiciones, con la finalidad de evitar que el equipo sufra daño y cause algún accidente.
2. Tomar como guía la descripción del montaje, cuando se tenga la necesidad de realizar el cambio de algunos componentes que necesiten cumplir con el protocolo o secuencia con la que se realizó el montaje, para que se tome una idea.
3. Considerando que el precipitador electrostático es de diseño alemán fabricado en la India por la empresa Clyde Bergemann, que se proporcionó una serie de planos y manuales, y que se contó con asesoría de técnicos especialistas, que al momento de existir alguna duda o problema de alto impacto, se deberá comunicar inmediatamente con los técnicos de Clyde Bergemann.
4. Asegurarse del seguimiento de los indicadores de mantenimiento apoyados con el sistema SAP, para tener un precipitador en funcionamiento constante.
5. Pedir en el tiempo adecuado, apoyados con SAP y la implementación del programa de mantenimiento, los elementos necesarios de sustitución o reparación, para tener en bodega y ser utilizados en el momento oportuno.

BIBLIOGRAFÍA

1. CLYDE BERGEMANN. *Installation & commissioning manual*. India: Clyde Bergemann, 2011. 152 p.
2. DE LA CRUZ, Jorge Fernando. *Operación de calderas en la planta de fuerza del Ingenio La Unión*. Trabajo de graduación Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1994. 92 p.
3. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Francisco Javier. *Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión*. Madrid: Fundación Confemetal, 2004. 263 p. ISBN 84-96169-36-7.
4. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.
5. LEZANA CHAJÓN, Luis Alberto. *Análisis de operación y funcionamiento de un clarificador de agua, oriunda de lavado de gases en calderas de Ingenio la Unión, S. A.* Trabajo de Graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 159 p.

6. MOLINA CALDERÓN, José. *De trapiche a ingenio: la aventura de una empresa familiar*. Guatemala: Fundación G&T Continental, 2004. 301p.
7. TAVARES, Lourival. *Administración moderna del mantenimiento*. Brasil: Novo Polo Publicações, 2007. 158 p.
8. *Tecnologías de mitigación de emisiones en centrales termoeléctricas a carbón.* [en línea].
<<http://web.ing.puc.cl/power/alumno10/mitigacion/Lavador%20Venturi-MP.html>>. [Consulta: enero de 2014].
9. WHITE, Harry J. *Industrial electrostatic precipitation*. London: Addison Wesley, 1963. 204 p.