



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

**PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS
CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE
COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S. A.**

Lesther Wilfredo Coloch González

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS
CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE
COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LESTHER WILFREDO COLOCH GONZÁLEZ
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

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. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez |
| VOCAL V | Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| EXAMINADOR | Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda |
| EXAMINADOR | Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS
CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE
COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S. A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 25 de septiembre de 2014.

Lesther Wilfredo Coloch González



Guatemala, 22 de septiembre de 2016
Ref.EPS.DOC.678.09.16.

Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Classon de Pinto.

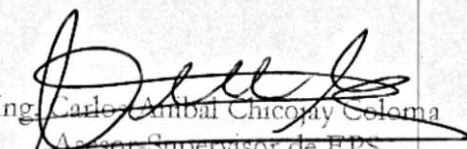
Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Lesther Wilfredo Coloch González** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 201020688, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S.A.**

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

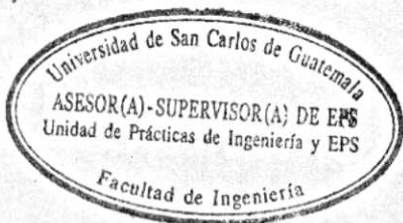
Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Carlos Ambal Chicoy Coloma
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica

c.c. Archivo
CACC/ra





Guatemala, 22 de septiembre de 2016
REF.EPS.D.378.08.16

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

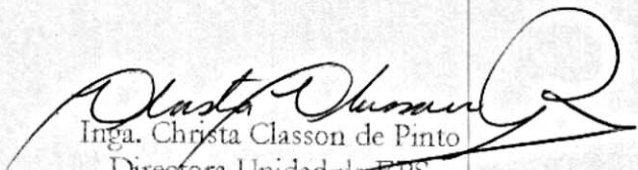
Estimado Ingeniero Guzmán:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S.A.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Lesther Wilfredo Coloch González** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero **carlos Anibal Chicojay Coloma**.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS



CCdP/ra



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

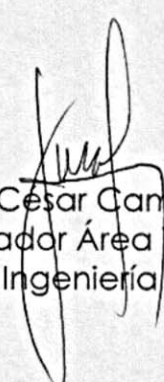
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.283.2016

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S. A.** desarrollado por el estudiante **Lesther Wilfredo Coloch González, carné 201020688** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área Térmica
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, octubre 2016



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.049.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S. A.** del estudiante **Lesther Wilfredo Coloch González, CUI 1575-16245-1503, Reg. Académico No. 201020688** 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, febrero de 2017



Ref. DTG.073.2017

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: **PROPUESTA PARA EL MONTAJE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CENIZAS CONTENIDAS EN EL AGUA PROVENIENTE DE LAVADORES DE GASES DE COMBUSTIÓN DE CALDERAS EN CENTRAL AGRO INDUSTRIAL GUATEMALTECA, S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Lesther Wilfredo Coloch González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

907/107
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, febrero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme vida, fortaleza, sabiduría e infinitas bendiciones para alcanzar esta meta.
- Mis padres** Rigoberto Coloch y Florinda González. Por todo el amor, consejos, motivación y apoyo incondicional que me han brindado. Siempre serán mi inspiración.
- Mis hermanos** Dheisy, Marlon y Erwin. Por el cariño, amistad y confianza en todos los momentos inolvidables que hemos compartido juntos.
- Mis abuelos** Brígido Coloch (q. e. p. d.), Juana López, Juan González y Alejandra Cajbón. Por su cariño, consejos, motivaciones y apoyo incondicional.
- Mi tío** Jorge González. Por todo el apoyo y consejos que me ha brindado.
- Mis amigos** Todos los que han sido parte de mi vida. Por su amistad, apoyo y motivación.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser mi alma máter y permitirme realizar mis estudios profesionales. |
| Facultad de Ingeniería | Por ser la fuente de conocimientos para realizarme como profesional. |
| Ingenio Madre Tierra | Por permitirme realizar mi Ejercicio Profesional Supervisado, adquiriendo conocimientos y creciendo profesionalmente. |
| Ingenieros | Hugo Mosquera y Mauricio Prera. Por darme la oportunidad de formar parte de su equipo, y por el apoyo para la realización de este proyecto. |
| Ingenieros | Mauricio Prera, Juan Marco Godoy, Juan Velásquez y Luis Jiménez. Por su apoyo para la realización de este trabajo. |
| Señores | Esaú Díaz, Jorge Cano, Carlos Barán, Gustavo Aguilar, Sergio Guerra y Edvin de la Rosa. Por su apoyo mediante sus experiencias para la realización de este trabajo. |
| Ing. Carlos Chicojay | Por su asesoría en la realización de este trabajo. |

Amigos de la facultad

Todos aquellos que compartieron su amistad y apoyo a lo largo de la carrera, creando recuerdos de experiencias inolvidables.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XIII |
| GLOSARIO | XV |
| RESUMEN..... | XIX |
| OBJETIVOS..... | XXI |
| INTRODUCCIÓN | XXIII |
| | |
| 1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA | 1 |
| 1.1. Descripción de la empresa | 1 |
| 1.2. Visión..... | 1 |
| 1.3. Misión | 1 |
| 1.4. Valores | 2 |
| 1.5. Reseña histórica..... | 2 |
| 1.6. Ubicación..... | 3 |
| 1.7. Organigrama del departamento de cogeneración | 4 |
| 1.8. Descripción de la actividad industrial..... | 5 |
| 1.8.1. Proceso para la producción de azúcar | 5 |
| 1.8.1.1. Cultivo de caña de azúcar | 5 |
| 1.8.1.2. Transportación al ingenio | 6 |
| 1.8.1.3. Preparación | 6 |
| 1.8.1.4. Molienda | 7 |
| 1.8.1.5. Clarificación | 9 |
| 1.8.1.6. Evaporación..... | 11 |
| 1.8.1.7. Cristalización | 13 |
| 1.8.1.8. Centrifugación o purga | 16 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.8.2. | Proceso para la producción de energía eléctrica | 16 |
| 1.8.2.1. | Generación de vapor | 17 |
| 1.8.2.2. | Turbogeneradores | 18 |
| 1.8.2.3. | Subestación eléctrica | 19 |
| 2. | FASE DE INVESTIGACIÓN..... | 21 |
| 2.1. | Generadores de vapor | 21 |
| 2.1.1. | Combustibles..... | 23 |
| 2.1.1.1. | Bagazo de caña de azúcar..... | 23 |
| 2.1.1.2. | Bunker C | 24 |
| 2.1.2. | Combustión | 25 |
| 2.2. | Lavadores de gases de combustión (<i>scrubber</i>) | 27 |
| 2.3. | Estudio ambiental..... | 30 |
| 2.4. | Conceptos básicos..... | 31 |
| 2.4.1. | Soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido | 31 |
| 2.4.1.1. | Electrodos revestidos para soldar aceros al carbono..... | 34 |
| 2.4.2. | Bombas hidráulicas | 36 |
| 2.4.2.1. | Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas | 36 |
| 2.4.2.2. | Bombas roto-dinámicas..... | 37 |
| 2.4.3. | Selección de bombas hidráulicas | 39 |
| 2.4.4. | Limpieza de gases mediante un precipitador electrostático | 41 |
| 3. | FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL | 45 |
| 3.1. | Situación actual..... | 45 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.1.1. | Sistema de lavado de gases de combustión tipo <i>venturide</i> alta presión | 46 |
| 3.1.2. | Piletas para la decantación de cenizas contenidas en el agua proveniente de los lavadores de gases de combustión de calderas | 47 |
| 3.2. | Costo para el montaje del proyecto | 49 |
| 3.3. | Montaje de la planta de tratamiento de agua con cenizas..... | 51 |
| 3.3.1. | Ubicación geográfica específica de la planta de tratamiento de agua con cenizas | 51 |
| 3.4. | Análisis del montaje de la planta de tratamiento de agua con cenizas..... | 53 |
| 3.4.1. | Análisis de cargas aplicadas en la estructura | 54 |
| 3.4.1.1. | Cargas verticales | 55 |
| 3.4.1.2. | Cargas horizontales..... | 56 |
| 3.4.2. | Cimentación para el montaje de la planta..... | 56 |
| 3.4.3. | Montaje de estructuras metálicas | 59 |
| 3.4.3.1. | Columnas..... | 60 |
| 3.4.3.2. | Vigas..... | 61 |
| 3.4.4. | Construcción e instalación de tanques de almacenamiento y tolvas decantadoras..... | 64 |
| 3.4.4.1. | Tanques para agua con cenizas y agua limpia | 65 |
| 3.4.4.2. | Tolvas decantadoras de lodos..... | 68 |
| 3.4.4.3. | Tanques para preparación de lechada de cal..... | 73 |
| 3.4.4.4. | Tanques para floculante | 77 |
| 3.4.5. | Instalación de equipos | 80 |
| 3.4.5.1. | Filtro rotativo para lodos | 80 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.4.5.2. | Prensa de tornillo para deshidratación de lodos..... | 83 |
| 3.4.5.3. | Bombas de agua con cenizas (agua sucia)..... | 85 |
| 3.4.5.4. | Bombas para agua limpia..... | 87 |
| 3.4.5.5. | Bombas de floculante..... | 90 |
| 3.4.6. | Alineación y acoplamiento de bombas con su elemento motriz (motor eléctrico)..... | 93 |
| 3.4.7. | Construcción y/o instalación de tuberías..... | 98 |
| 3.4.7.1. | Tubería para agua con cenizas (agua sucia)..... | 98 |
| 3.4.7.2. | Tubería para agua limpia (agua clarificada)..... | 100 |
| 3.4.7.3. | Tubería para floculante..... | 102 |
| 3.4.7.4. | Tubería para lechada de cal..... | 103 |
| 3.4.7.5. | Tubería para agua filtrada de lodos.... | 104 |
| 3.4.7.6. | Tubería para llenado y reposición de agua..... | 106 |
| 3.4.8. | Instalación de equipos de automatización industrial..... | 107 |
| 3.4.8.1. | Sistema de dosificación automática de lechada de cal..... | 107 |
| 3.4.8.2. | Medición de flujo de floculante líquido..... | 109 |
| 3.4.8.3. | Medición de flujo de agua con cenizas y agua clarificada..... | 110 |
| 3.4.8.4. | Instalación de medidores de nivel para los tanques de agua con cenizas y agua clarificada..... | 113 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.5. | Neutralización de la acidez del agua con cenizas | 115 |
| 3.6. | Floculación | 116 |
| 3.6.1. | Producto | 116 |
| 3.6.1.1. | Seguridad | 117 |
| 3.6.1.2. | Manipulación y almacenamiento..... | 117 |
| 3.6.1.3. | Estabilidad y reactividad | 117 |
| 3.6.1.4. | Propiedades físicas y químicas | 118 |
| 3.6.1.5. | Aplicaciones..... | 118 |
| 3.6.1.6. | Beneficios | 119 |
| 3.6.1.7. | Distribución | 119 |
| 3.6.2. | Dosificación del producto..... | 119 |
| 3.6.3. | Procedimiento para la preparación del floculante en solución..... | 120 |
| 3.7. | Descripción del proceso | 121 |
| 3.8. | Perfil del sistema | 121 |
| 3.9. | Operación normal | 123 |
| 3.9.1. | Evaluación | 123 |
| 3.9.2. | Prueba de funcionamiento de equipos | 123 |
| 3.9.3. | Puesta en marcha del sistema..... | 124 |
| 3.9.3.1. | Procedimiento previo a la puesta en marcha..... | 124 |
| 3.9.3.2. | Procedimiento para la puesta en marcha..... | 124 |
| 3.10. | Mantenimiento | 127 |
| 3.10.1. | Actividades de mantenimiento en tiempo de operación..... | 127 |
| 3.10.2. | Actividades de mantenimiento en tiempo de reparación..... | 128 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.10.3. | Costos de operación y mantenimiento del proyecto..... | 129 |
| 3.11. | Eficiencia..... | 130 |
| 3.11.1. | Eficiencia de remoción de las cenizas contenidas en el agua proveniente de los <i>scrubbers</i> | 131 |
| 3.11.2. | Eficiencia de remoción de agua contenida en las cenizas extraídas del fondo de las tolvas decantadoras..... | 132 |
| 4. | FASE DE DOCENCIA..... | 135 |
| 4.1. | Equipo de protección personal..... | 135 |
| 4.2. | Panorama de riesgos | 135 |
| 4.2.1. | Panorama de riesgos físicos | 136 |
| 4.2.2. | Panorama de riesgos químicos | 136 |
| 4.2.3. | Panorama de riesgos biológicos | 137 |
| 4.2.4. | Panorama de riesgos mecánicos | 138 |
| 4.3. | Actos inseguros..... | 138 |
| 4.4. | Normas y medidas de seguridad..... | 139 |
| 4.5. | Sanciones | 141 |
| | CONCLUSIONES..... | 143 |
| | RECOMENDACIONES | 145 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 147 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Ubicación geográfica del ingenio Madre Tierra | 3 |
| 2. | Organigrama del departamento de cogeneración | 4 |
| 3. | Cultivo de caña de azúcar | 5 |
| 4. | Patio de caña del ingenio | 7 |
| 5. | Molienda de caña de azúcar | 8 |
| 6. | Clarificación de jugo de caña de azúcar..... | 10 |
| 7. | Proceso de clarificaciónde jugo de caña de azúcar | 12 |
| 8. | Obtención de azúcar cruda y miel A | 13 |
| 9. | Obtención de miel B y magma B..... | 14 |
| 10. | Obtención de magma C y melaza | 15 |
| 11. | Ubicación de calderas | 22 |
| 12. | <i>Venturi</i> con inyección de agua en la sección convergente..... | 28 |
| 13. | <i>Venturi</i> con la inyección de agua en la garganta..... | 29 |
| 14. | Proceso de soldadura SMAW | 32 |
| 15. | Equipo básico de soldadura con arco eléctrico (SMAW)..... | 33 |
| 16. | Diagrama esquemático de un precipitador electrostático..... | 42 |
| 17. | Precipitador electrostático | 43 |
| 18. | Sistema de lavado de gases de combustión, caldera # 5 | 46 |
| 19. | Pileta de decantación de Ingenio Madre Tierra..... | 48 |
| 20. | Dimensiones de las piletas de sedimentación..... | 48 |
| 21. | Ubicación geográfica específica de la planta de tratamiento de agua con cenizas | 52 |
| 22. | Área donde se realizó la cimentación de la planta | 53 |

| | | |
|-----|---|----|
| 23. | Diagrama simplificado del sistema de tratamiento de agua con cenizas..... | 54 |
| 24. | Cargas muertas sobresalientes en la estructura de la planta de tratamiento de agua con cenizas | 55 |
| 25. | Tensión transmitida al terreno | 56 |
| 26. | Vista de planta de diseño estructural de zapatas | 58 |
| 27. | Sección típica de perfiles de acero más utilizados en la construcción con estructura metálica..... | 60 |
| 28. | Perfil de sección I, H..... | 61 |
| 29. | Estructura de la planta montada | 62 |
| 30. | Tubos redondos para arriostamiento de la estructura | 63 |
| 31. | Instalación de vigas de sección circular para refuerzo de la estructura..... | 63 |
| 32. | Corte adecuado para la colocación de malla expandida en pasillo | 64 |
| 33. | Cilindro donde se obtuvieron los tanques para agua sucia y limpia | 65 |
| 34. | Vista de planta de las bases de concreto armado para tanques de agua con cenizas y agua clarificada | 66 |
| 35. | Instalación de tanque para agua con cenizas..... | 67 |
| 36. | Instalación de tanque para agua limpia | 67 |
| 37. | Cuerpo geométrico de las tolvas para la decantación de lodos..... | 68 |
| 38. | Construcción de tolva para la decantación de lodos..... | 70 |
| 39. | Construcción de una de las piezas prismáticas rectangulares | 70 |
| 40. | Construcción de un cargador de tolva decantadora de lodos | 71 |
| 41. | Ensamble de pieza de forma prismática rectangular en la parte superior de las tolvas de decantación..... | 71 |
| 42. | Finalizando la construcción de las tolvas decantadoras de lodos..... | 72 |
| 43. | Instalación de tolvas decantadoras de lodos en estructura | 73 |
| 44. | Construcción de tanque para preparación de lechada de cal. | 74 |
| 45. | Instalación de tanques para preparación de lechada de cal | 75 |

| | | |
|-----|---|----|
| 46. | Eje utilizado para el agitador mecánico..... | 76 |
| 47. | Mecanismo del agitador de lechada de cal | 76 |
| 48. | Bases de dos de los tres tanques para floculante | 77 |
| 49. | Construcción de tanques para floculante | 78 |
| 50. | Construcción de bases para tanques de floculante..... | 78 |
| 51. | Instalación de tanque para preparación de floculante | 79 |
| 52. | Instalación de tanques de dosificación de floculante | 80 |
| 53. | Partes principales del filtro rotativo | 81 |
| 54. | Instalación de filtros rotativos | 83 |
| 55. | Sección transversal de la prensa de tornillo..... | 83 |
| 56. | Prensa de tornillo para deshidratación de lodos | 84 |
| 57. | Instalación de prensa desaguadora de tornillo..... | 85 |
| 58. | Zanja para la construcción de bases de las bombas de agua sucia | 86 |
| 59. | Instalación de bombas de agua sucia | 87 |
| 60. | Construcción de bases para la instalación de bombas de agua limpia..... | 89 |
| 61. | Instalación de motor y bomba # 2, de agua limpia | 89 |
| 62. | Sección de bomba volumétrica de cavidad progresiva marca NEMO BY | 91 |
| 63. | Armadura de la base para la instalación de los motores y bombas de floculante..... | 92 |
| 64. | Instalación de bombas de floculante | 92 |
| 65. | Alineación angular incorrecta..... | 94 |
| 66. | Alineación en paralelo incorrecta | 94 |
| 67. | Alineación correcta..... | 95 |
| 68. | Alineación de bomba # 1 son su motor eléctrico | 95 |
| 69. | Rejilla de acoplamiento | 96 |
| 70. | Insertión de rejilla de acoplamiento | 96 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 71. | Inserción de rejilla de acoplamiento de la bomba #1 de agua con cenizas con su motor eléctrico..... | 97 |
| 72. | Aplicación de grasa y ensamble de la cubierta dividida..... | 97 |
| 73. | Máquina roladora eléctrica..... | 98 |
| 74. | Construcción de un codo a 90° de 12 pulgadas de diámetro a base de láminas de acero inoxidable | 99 |
| 75. | Realización de zanja para la instalación de tubería para agua con cenizas..... | 100 |
| 76. | Modificación de tubería para agua limpia | 101 |
| 77. | Detalle de la inyección de floculante..... | 102 |
| 78. | Instalación de tubería de floculante | 103 |
| 79. | Instalación de tubería de lechada de cal..... | 104 |
| 80. | Instalación de tubería para agua filtrada del filtro rotativo..... | 105 |
| 81. | Ensamblaje e instalación de tubería para agua filtrada de la prensa deshidratadora de lodos | 105 |
| 82. | Sensor y transmisor de pH de agua con cenizas..... | 108 |
| 83. | Instalación de válvula y su actuador neumático para la dosificación de lechada de cal..... | 109 |
| 84. | Instalación de medidor de flujo de floculante líquido..... | 110 |
| 85. | Instalación de transmisor de flujo de agua con cenizas..... | 111 |
| 86. | Instalación de transmisor de flujo de agua clarificada..... | 112 |
| 87. | Instalación de transmisor de nivel de tanque de agua con cenizas | 114 |
| 88. | Pantalla de supervisión y control de parámetros de la planta de tratamiento de agua con cenizas | 115 |

TABLAS

| | | |
|----|--|----|
| I. | Productos gaseosos típicos de la combustión del bagazo de caña de azúcar | 26 |
|----|--|----|

| | | |
|--------|---|-----|
| II. | Límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para instalaciones de combustión | 30 |
| III. | Posiciones para soldar, según el tipo de electrodo | 35 |
| IV. | Tipo de revestimiento y de corriente de electrodos | 35 |
| V. | Costo aproximado para el montaje de la planta de tratamiento de cenizas | 50 |
| VI. | Peso estructural aproximado..... | 57 |
| VII. | Características de transmisor de flujo magnético de agua con cenizas | 111 |
| VIII. | Características de transmisor de flujo magnético de agua clarificada | 112 |
| IX. | Propiedades físicas y químicas del floculante Superfloc C-492HMW | 118 |
| X. | Parámetros medidos en los motores eléctricos..... | 126 |
| XI. | Costo de operación del sistema en tiempo de zafra (6 meses)..... | 129 |
| XII. | Costo para el mantenimiento del sistema en tiempo de reparación (no zafra)..... | 130 |
| XIII. | Resultados de las muestras de entrada y salida de las celdas | 131 |
| XIV. | Resultados promedio de las muestras de entrada y salida del proceso de filtración | 132 |
| XV. | Panorama de riesgos físicos | 136 |
| XVI. | Panorama de riesgos químicos | 137 |
| XVII. | Panorama de riesgos biológicos | 137 |
| XVIII. | Panorama de riesgos mecánicos | 138 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|--------------------------|---|
| A | Amperio |
| HP | Caballos de potencia |
| cP | Centipoise |
| gpm | Galones por minuto |
| °C | Grado Celsius |
| °F | Grado Fahrenheit |
| Hz | Hercio |
| h | Hora |
| kg | Kilogramo |
| kW | Kilovatio |
| kWh | Kilovatio-hora |
| lb | Libra |
| PSI | Libra-fuerza por pulgada cuadrada |
| m | Metro |
| m³ | Metro cúbico |
| m³/h | Metro cúbico por hora |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| mg/Nm³ | Miligramo por metro cúbico, en condiciones normales |
| mL | Mililitro |
| mPas | Milipascal segundo |
| ppm | Partes por millón |
| % | Porcentaje |
| pH | Potencial de hidrógeno |

| | |
|------------|--------------------------|
| Q | Quetzal |
| RPM | Revoluciones por minuto |
| BTU | Unidad térmica británica |
| V | Voltio |

GLOSARIO

| | |
|------------------------------|--|
| Acometida | Conjunto de elementos interconectados que unen una red de distribución con la instalación de un cliente. |
| Bagazo | Material sólido y fibroso que se obtiene en el proceso de molienda de caña de azúcar; se utiliza como combustible en las calderas. |
| Bancada | Estructura de metal donde se ancla cualquier maquinaria para su operación de trabajo. |
| Carga | Fuerza que actúa sobre una estructura. |
| Cogeneración | Producción simultánea de energía eléctrica y energía térmica útil, partiendo de un combustible. |
| Decantación | Proceso para la separación de dos sustancias mezcladas, mediante el vertido de la más densa. |
| Disolución o solución | Mezcla homogénea formada por un disolvente y por uno o varios solutos que no reaccionan entre sí. |
| Electrodo | Material de aporte que se utiliza en soldadura al arco eléctrico. |

| | |
|----------------------------|---|
| Esfuerzo | Tensión interna que se experimenta en cuerpos como resultado de la aplicación de cargas. |
| Estructura | Elemento o conjunto de ellos que forman parte resistente y sustentante de una construcción. |
| Fertirriego | Método que combina la aplicación de agua de riego con los fertilizantes para nutrir los cultivos. |
| Floculante | Polímero sintético que aglutina sólidos en suspensión, provocando su precipitación. |
| Hormigón (concreto) | Material compuesto, formado regularmente de cemento y áridos (grava, gravilla y arena), con una proporción de agua. |
| Motor eléctrico | Máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica, por medio de interacciones electromagnéticas. |
| PH | Medida de acidez o alcalinidad de una solución que indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas disoluciones. |
| Roladora | Máquina eléctrica o manual que se utiliza para dar forma curva a planchas de metal. |
| Scrubber | Lavador de gases instalado en la salida del ventilador de tiro inducido de calderas. |

| | |
|-------------------------------|---|
| Sedimentación | Proceso por el cual el sedimento en movimiento se deposita. |
| Válvula | Dispositivo mecánico que controla el paso de un fluido en uno o más orificios o conductos. |
| Variador de frecuencia | Sistema de control de velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. |

RESUMEN

El presente trabajo de graduación fue desarrollado durante el Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), en las instalaciones de la empresa Central Agro Industrial Guatemalteca, S. A., conocida comúnmente como ingenio Madre Tierra, específicamente en el departamento de Cogeneración. A través de este ejercicio se pusieron en práctica la investigación, el diseño y el análisis de los conocimientos adquiridos en el estudio de la ingeniería mecánica.

Para la generación de vapor en las calderas del ingenio Madre Tierra se utiliza como combustible principal el bagazo de caña de azúcar, pero este genera cantidades considerables de cenizas en los gases de combustión. Para atender a los reglamentos que existen hoy en día sobre la emisión de particulado de cenizas hacia la atmósfera, algunas de las calderas ya cuentan con sistemas de lavadores de gases de combustión que captan las cenizas en suspensión, requiriendo un suministro continuo de agua.

Para ayudar en la conservación del agua se propone el montaje de una planta de tratamiento que ha sido utilizada en los lavadores de gases de combustión de las calderas (*scrubber*), buscando hacer de este un proceso continuo, al utilizar el agua nuevamente en los lavadores de gases y así evitar consumir grandes caudales que son tomados de los afluentes.

Debido a que el tema es de mucha importancia, se ha decidido realizar el montaje de acuerdo a los diseños realizados, y con la asesoría de un experto en el tema, por lo tanto, se detalla todo lo relacionado al montaje y su funcionamiento.

OBJETIVOS

General

Realizar la propuesta para el montaje de una planta de tratamiento de cenizas contenidas en el agua proveniente de lavadores de gases de combustión de calderas en Central Agro Industrial Guatemalteca, S. A., para poder utilizar esta nuevamente en dichos lavadores.

Específicos

1. Estudiar el diseño y funcionamiento de la planta de tratamiento.
2. Calcular el costo para la realización del montaje de la planta de tratamiento.
3. Calcular los costos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento.
4. Calcular la eficiencia del funcionamiento de la planta de tratamiento.
5. Establecer un control rutinario de los equipos de la planta de tratamiento para una operación adecuada.
6. Identificar y controlar los diferentes tipos de riesgos en el área de la planta de tratamiento.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las industrias mundiales han tomado como prioridad la conservación del medio ambiente, ocupándose del reciclaje de los recursos naturales y del manejo adecuado de los desechos de un proceso.

En Central Agro Industrial Guatemalteca, S. A. se aprovecha el residuo de la molienda (bagazo de caña de azúcar) para utilizarlo como combustible en las calderas para la generación de vapor; pero la combustión de este genera particulado de cenizas que viajan con los gases de combustión, por lo cual se tienen implementados algunos sistemas de lavadores de gases de combustión (*scrubber*) para captar las partículas, utilizándose agua cruda (sin tratamiento) tomada de los afluentes naturales.

Actualmente el agua, después de captar las cenizas de los gases de combustión, es conducida en canales abiertos hacia unas piletas de sedimentación para separarle las cenizas, recuperándose un flujo útil de agua que se utiliza para fertirriego, sin embargo, en épocas de invierno el agua recuperada no es necesaria para dicho propósito. Para poder operar se hace la propuesta sobre el montaje de una planta para tratar el agua que se obtiene de los lavadores de gases de combustión de calderas (agua con cenizas), con el objetivo de reciclarla y así contribuir en la conservación del medio ambiente, ya que el agua de los afluentes naturales puede ser utilizada para otras aplicaciones de trabajo o para otros fines humanos.

Con el montaje y operación de la planta ya no se conducirá el agua que ha captado cenizas de los gases de combustión a las piletas de sedimentación, ya

que ella será la encargada de separarle las cenizas mediante la floculación de dichas partículas, haciendo que estas se precipiten, obteniéndose agua limpia que se utilizará nuevamente en los lavadores. Las cenizas extraídas con poca humedad se mezclarán con la cachaza (desecho obtenido en la limpieza de jugo de caña) y se aprovecharán en el campo para utilizarlas como *compost* (abono orgánico).

1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA

1.1. Descripción de la empresa

Central Agro Industrial Guatemalteca, S. A., conocida también como ingenio Madre Tierra, es una instalación industrial dedicada a la producción de azúcar y a la cogeneración, teniendo como materia prima la caña de azúcar. Es un ingenio a la vanguardia del desarrollo de la agroindustria azucarera guatemalteca.

1.2. Visión

“Trabajar siempre hacia el largo plazo, buscando ser el eje de una asociación productiva, líder en la agregación del valor a los derivados de la caña de azúcar”¹.

1.3. Misión

“Es la producción rentable de materias primas, derivadas del cultivo y procesamiento eficiente de la caña de azúcar”².

¹ Visión proporcionada por Ingenio Madre Tierra.

² *Ibíd.*

1.4. Valores

“Honestidad, cooperación, verdad, honradez, justicia, solidaridad, amistad, sinceridad, amor al prójimo, confiabilidad, discreción, lealtad”³.

1.5. Reseña histórica

El ingenio se instaló en la finca Madre Tierra, importado de Jamaica bajo la responsabilidad del ingeniero puertorriqueño Jesús Hernández Vallejo, quien tuvo a su cargo el montaje total del mismo, iniciando el 7 de enero de 1963. La primera zafra inició el 23 de noviembre de 1963 a las 8:15 horas. La producción total de azúcar en la primera zafra fue de 107 808 toneladas, con un rendimiento de 178,43 libras de azúcar / tonelada de caña molida. El 7 de diciembre de 1964 se realiza la primera exportación de azúcar; días después, el 13 de diciembre, se exporta hacia El Salvador miel final (melaza). A partir de 1993 se ejecutaron nuevos proyectos que incluyen la construcción de las siguientes instalaciones:

- Talleres para la reparación de vehículos.
- Gasolinera.
- Cogeneración (calderas # 5, # 6 y # 7; turbogenerador de 5 MW de escape-extracción y de 15 MW de condensación; y una subestación eléctrica).

A partir de 1996 el ingenio cogeneraba 20 000 kWh, actualmente se cogenera 30 000 kWh, parte de esta energía es utilizada para consumo interno del ingenio y el excedente es vendido a la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.

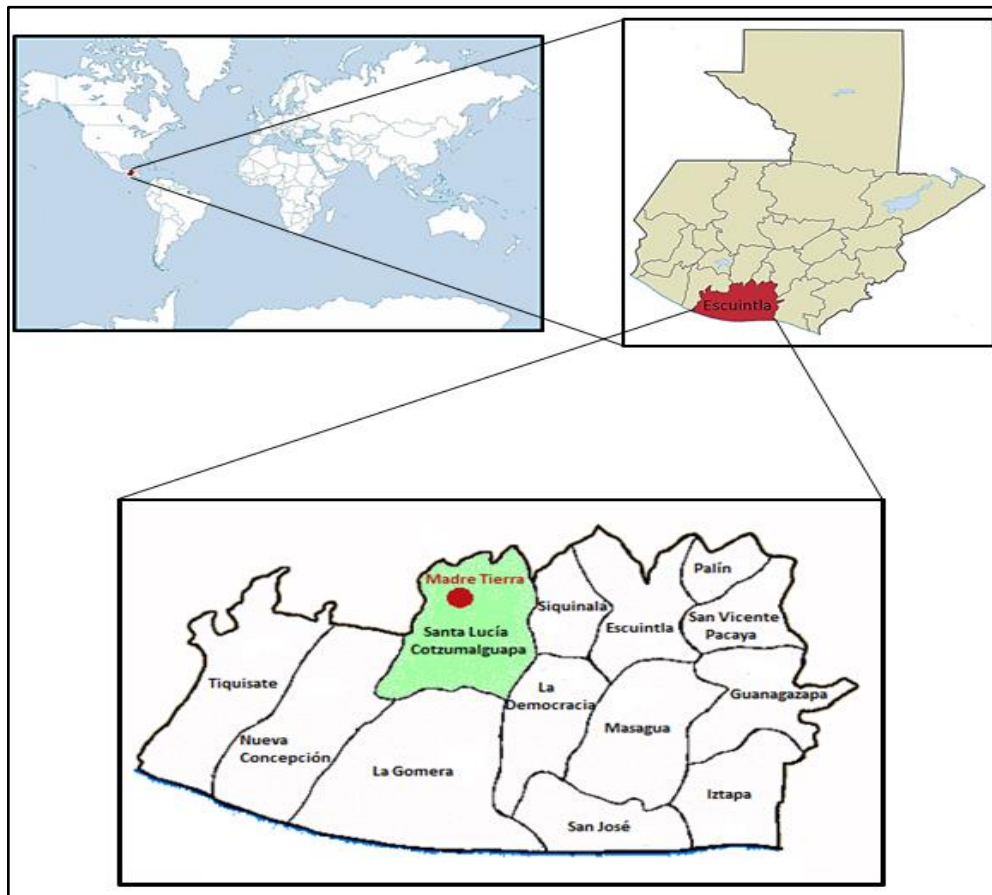
³ Valores proporcionados por Ingenio Madre Tierra.

A. (EEGSA), institución privada que tiene a su cargo la distribución de energía eléctrica para un sector del país.

1.6. Ubicación

Las instalaciones del ingenio se encuentran ubicadas a 330 msnm, en el kilómetro 94,5 de la Carretera al Pacífico, en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, departamento de Escuintla, Guatemala.

Figura 1. Ubicación geográfica del ingenio Madre Tierra

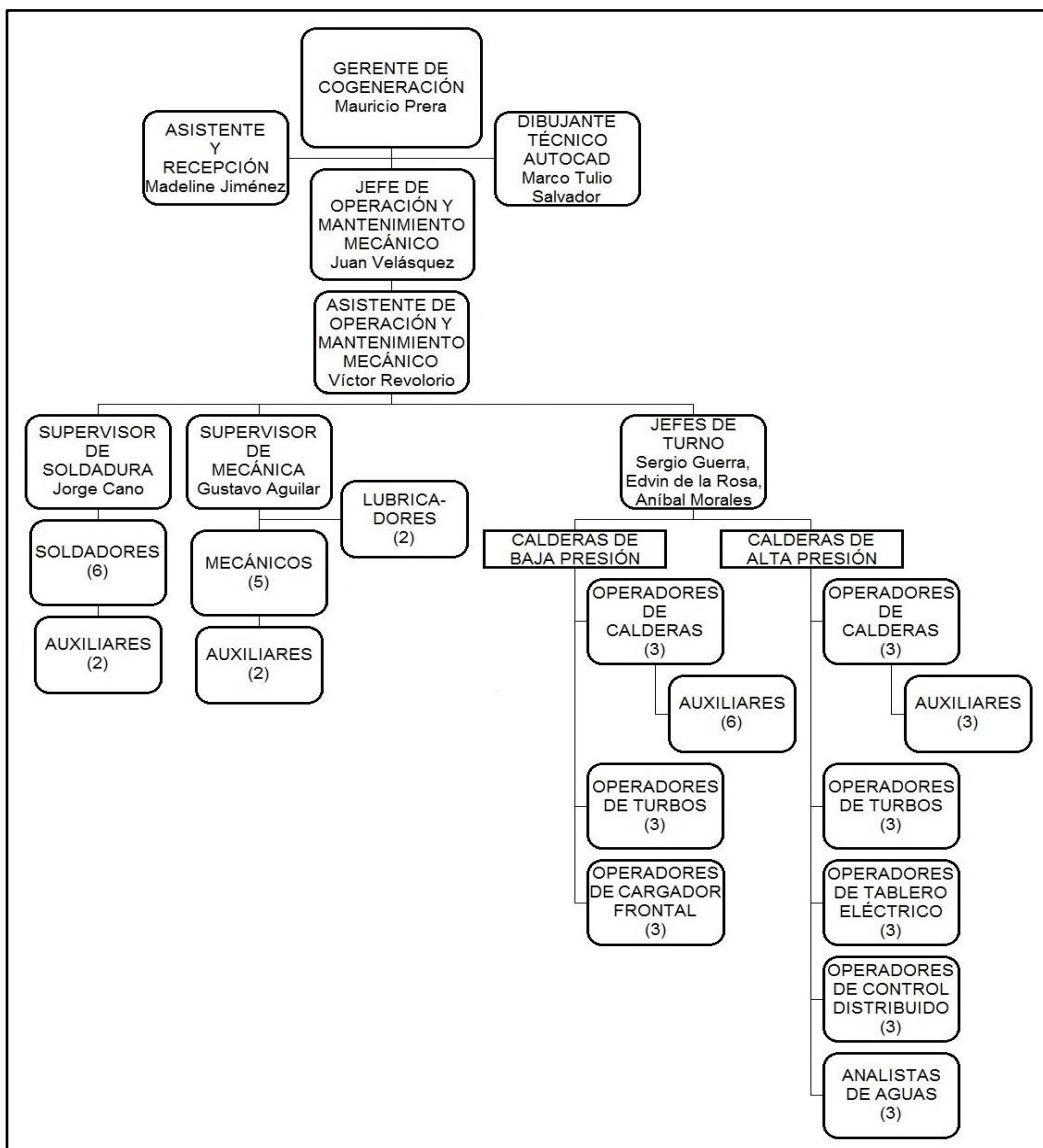


Fuente: elaboración propia.

1.7. Organigrama del departamento de cogeneración

A continuación se presenta el organigrama del departamento donde se llevó a cabo el proyecto.

Figura 2. Organigrama del departamento de cogeneración



Fuente: Ingenio Madre Tierra. Archivos de Ingeniería de área industrial. Consulta: julio de 2015.

1.8. Descripción de la actividad industrial

1.8.1. Proceso para la producción de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) ha sido una de las plantas más importantes del país, por los productos derivados de su proceso. A continuación se hace un resumen del proceso para la fabricación de azúcar.

1.8.1.1. Cultivo de caña de azúcar

Se inicia con la adecuación del campo y el estudio del suelo, y de acuerdo a ello se definen variedades de caña a cultivar; se localizan canales de riego, drenaje y vías de acceso. El suelo se rotura haciendo uso de maquinaria y equipos especializados, dejándolo en adecuadas condiciones para la siembra. Después, se optimiza la aplicación y distribución eficiente del agua, mediante sistemas de riego por gravedad, surcos o aspersión simulando lluvia. Se realiza análisis foliar, control de malezas y aplicación técnica de fertilizantes para obtener un adecuado desarrollo del cultivo.

Figura 3. Cultivo de caña de azúcar



Fuente: *Cultivo de caña*. <http://www.lavozdelsandinismo.com/nicaragua/2013-12-17/elevado-el-cultivo-de-cana-en-nicaragua/>. Consulta: marzo de 2015.

El corte se realiza manual o mecánicamente, utilizando parámetros de calidad que disminuyen los porcentajes de materia extraña.

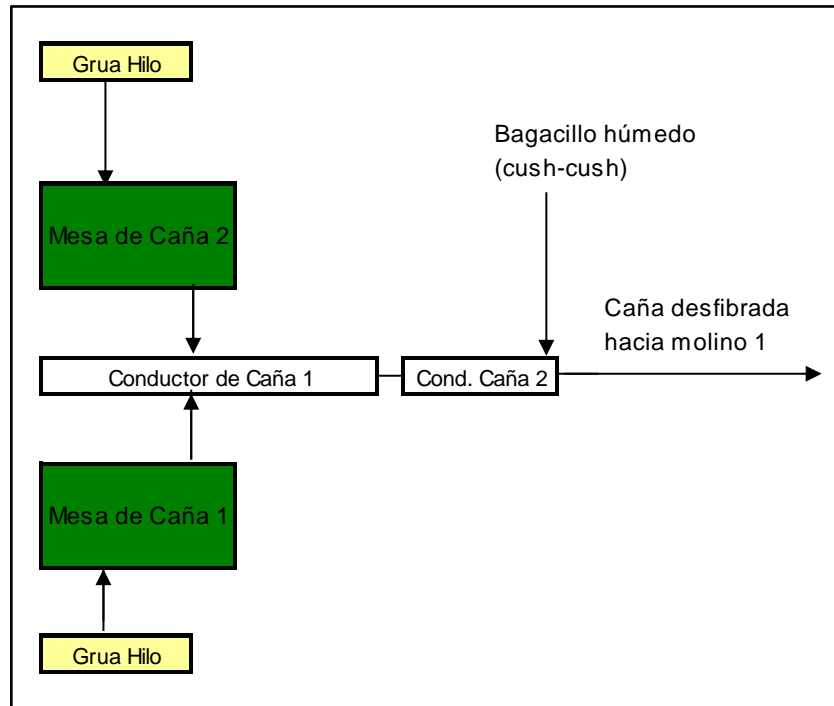
1.8.1.2. Transportación al ingenio

Una vez cortada la caña, se alza mecánicamente del campo y se transporta al patio de caña del ingenio en tractores y camiones con los menores tiempos de permanencia, para evitar el deterioro de su calidad, ya que disminuye el contenido de sacarosa. El corte de caña se realiza en un 75 % manualmente y un 25 % mecánicamente.

1.8.1.3. Preparación

Los camiones pasan al patio de caña y con grúas hilo se voltean sus jaulas hacia las mesas alimentadoras para descargar la caña. Durante el paso de la caña en las mesas se lava con agua para eliminarle las impurezas externas (esto se realiza únicamente con caña cortada manualmente) y se hace pasar por una máquina troceadora que la corta, dejándola con una longitud más pequeña de aproximadamente 5 pulgadas. Después de pasar la caña por la troceadora, cae a un conductor de caña # 1 y luego al conductor de caña # 2; estos trasladan la caña a los molinos, pasando por una máquina (desfibradora) que la desfibra para que sea más efectiva la extracción de jugo en los molinos. Es útil observar la figura de la siguiente página:

Figura 4. **Patio de caña del ingenio**



Fuente: elaboración propia.

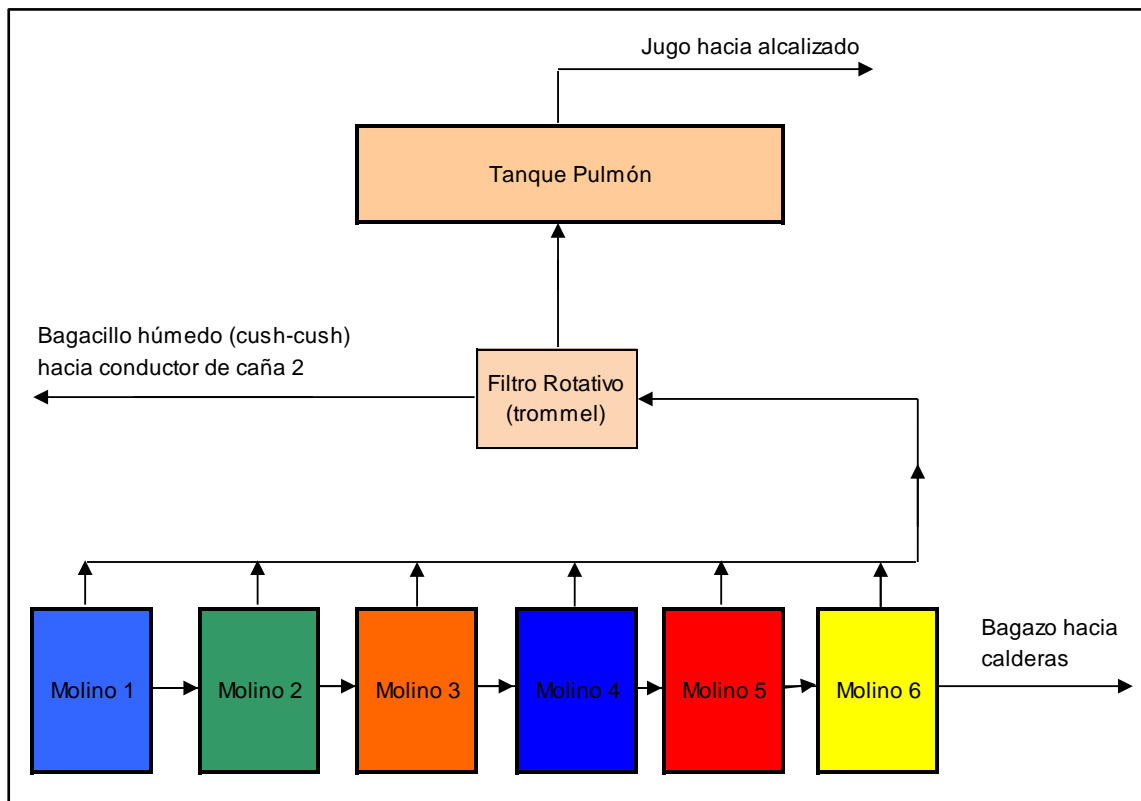
1.8.1.4. **Molienda**

Es el proceso de extracción de jugo de caña de azúcar mediante su compresión en unos molinos; esta caña es la que ha sido desfibrada. Se cuenta con un tándem de seis molinos montados en serie, de los cuales cuatro son accionados por turbinas de vapor y dos son accionados por motores eléctricos. Cada molino contiene cuatro mazas (superior o mayor, cañera o de alimentación, bagacera o de descarga y cuarta maza) y la separación entre cada una de ellas, llamada *setting*, varía en cada molino. Para un proceso de molienda más eficiente, al bagazo que ingresa en el último molino se le agrega agua de imbibición, con el fin de extraerle la mayor cantidad de sacarosa, y la

mezcla obtenida, llamada maceración, se agrega al bagazo que ingresa en el molino cinco, y así sucesivamente hasta el molino dos.

En el molino uno se obtiene jugo puro o primario, que se mezcla con lo que se obtiene del molino dos. Seguidamente es bombeado a un *trommel* (filtro rotativo) para captar el bagazo que este contiene, que posteriormente se conduce al molino uno para iniciar nuevamente su proceso de extracción de jugo. El jugo filtrado cae por gravedad a un tanque (tanque pulmón). Puede verse la siguiente figura:

Figura 5. **Molienda de caña de azúcar**



Fuente: elaboración propia.

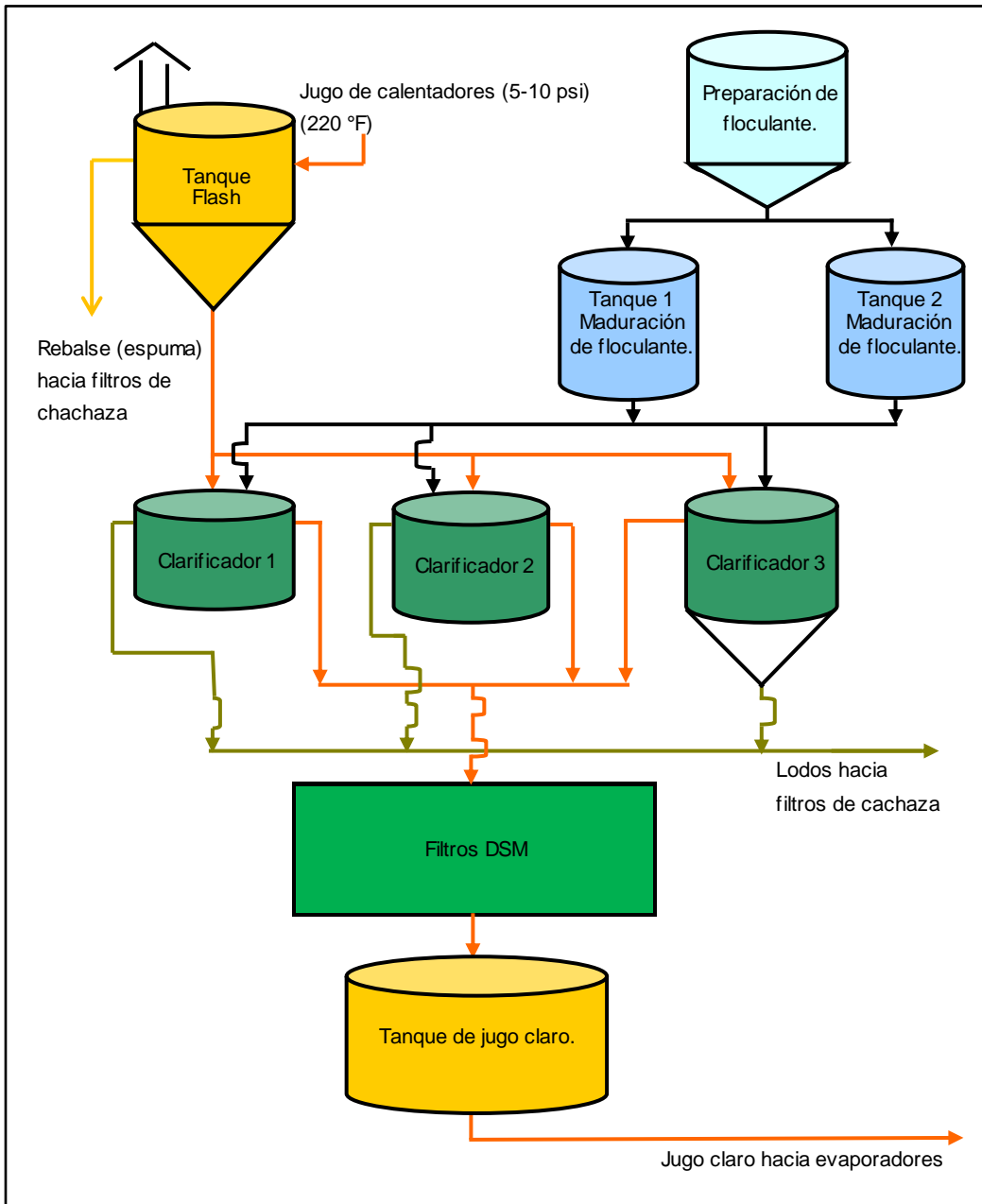
El bagazo obtenido de la molienda se aprovecha para usarlo como combustible en las calderas para la generación de vapor.

1.8.1.5. Clarificación

El jugo contenido en el tanque pulmón (con aproximadamente 100 °F de temperatura) se bombea al tanque de alcalizado, donde se le agrega sacarato de calcio (meladura concentrada y lechada de cal hidratada) para neutralizar su acidez natural. El jugo alcalizado obtenido ingresa en los calentadores primarios para elevarle su temperatura a 200 °F, luego en los calentadores secundarios para elevarle todavía más su temperatura hasta 220 °F, y posteriormente es enviado al tanque *flash* (ver figura 6).

El calentamiento del jugo logra que este al ser liberado a presión atmosférica sufra una pequeña evaporación en el tanque *flash*, eliminándole burbujas para evitar que los sólidos disueltos decanten con lentitud por la presencia de estas. Seguidamente el jugo es enviado a los clarificadores, donde se le agrega floculante aniónico para la concentración de sus lodos, que se precipitan en el fondo del clarificador, separándolos del jugo claro que se desborda en la parte superior. Puede verse la figura de la siguiente página:

Figura 6. Clarificación de jugo de caña de azúcar



Fuente: elaboración propia.

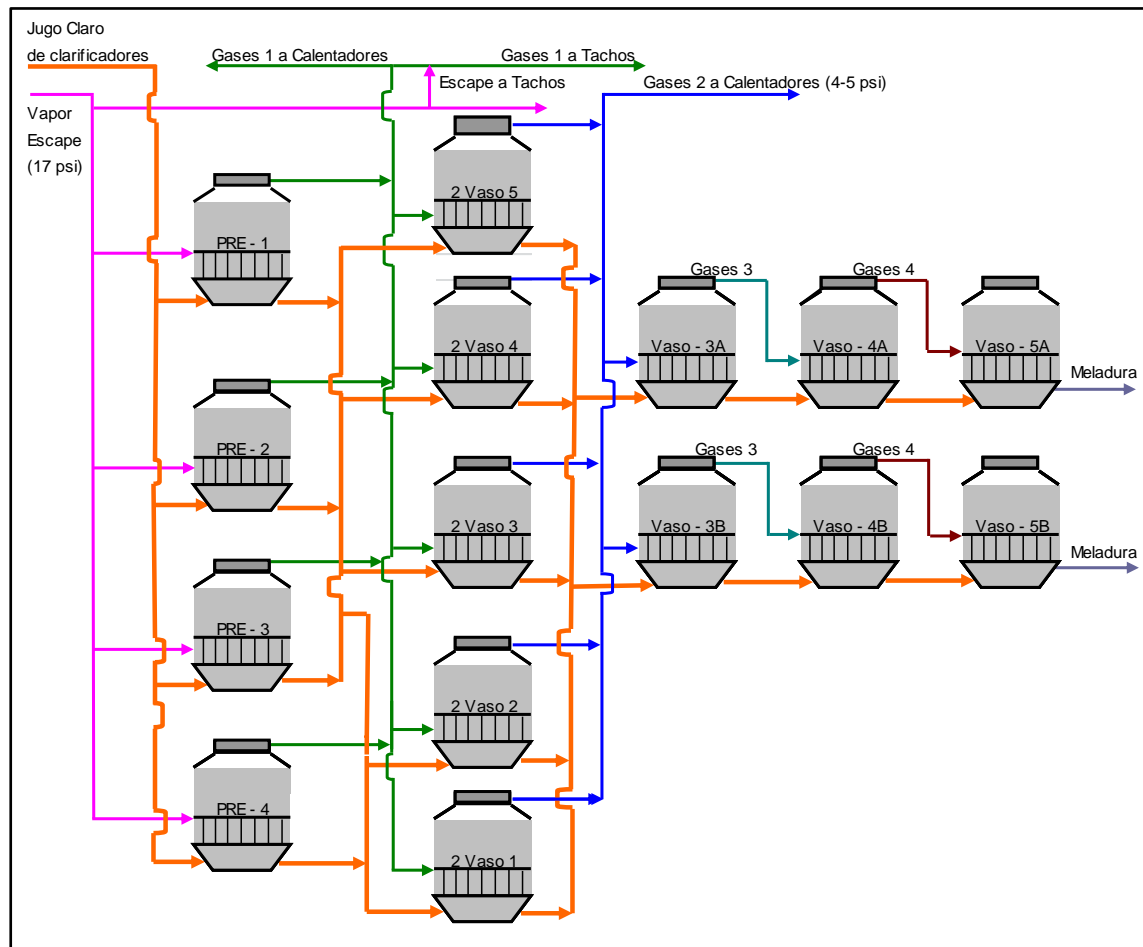
Los lodos obtenidos del clarificador son llevados a un tanque donde se les agrega bagacillo (obtenido de la tamización del bagazo), que seguidamente es bombeado a unos filtros rotatorios al vacío para recuperarle cierta cantidad de jugo que retorna al tanque de alcalizado. Como resultado de la filtración de los lodos, se obtiene un producto llamado cachaza que se usa como abono natural para el cultivo de la caña de azúcar.

1.8.1.6. Evaporación

El jugo claro obtenido de los clarificadores se deposita en un tanque donde seguidamente se bombea para los calentadores de placas para jugo y luego para los evaporadores, en los cuales el vapor y el jugo se encuentran en cámaras separadas. El jugo ingresa primero en los preevaporadores y por medio de vapor de escape de 18 PSI, obtenido de las turbinas de los molinos, evapora el agua que este contiene generando gases uno.

Los gases de escape se condensan y caen al tanque de transferencia de cogeneración. El jugo no evaporado en los preevaporadores ingresa a los segundos vasos, y es evaporado por los gases uno generando gases dos, y el jugo no evaporado en los segundos vasos ingresa a las series A, B y C. Los gases generados en las series ingresan a un condensador barométrico para condensarse, después caen a una fosa para llevarlos a una zanja. El jugo que ingresa a los evaporadores contiene alrededor de 15 grados Brix y sale convertido en meladura con 62 grados Brix, eliminándole alrededor del 75 % de agua. Es recomendable ver la siguiente figura:

Figura 7. **Proceso de clarificación de jugo de caña de azúcar**



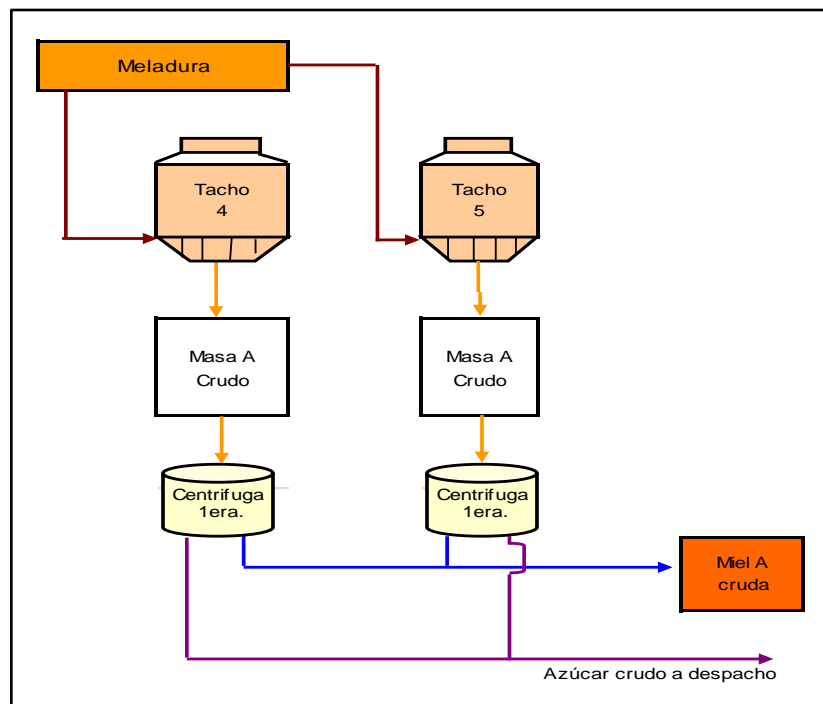
Fuente: elaboración propia.

La meladura obtenida se bombea para los calentadores de meladura, seguidamente es purificada en unos clarificadores de meladura y luego es llevada a los tachos.

1.8.1.7. Cristalización

Para la producción de azúcar crudo, la meladura obtenida de los evaporadores a inicio de zafra es enviada al tacho tres para continuar con la evaporación y quedar concentrada a 82 grados Brix. En ese momento se añaden semillas (alcohol isopropílico y azúcar molido) que sirven de núcleos para los cristales de azúcar. A medida que se evapora el agua se añade más meladura, con el fin de aumentar el tamaño de los cristales hasta llegar a nivel de operación del tacho. Seguidamente se realizan cortes hacia los tachos cuatro y cinco, para aumentar el crecimiento de los granos y obtener masa A, en donde esta se envía a las centrífugas automáticas de primera, para obtener azúcar crudo y miel A, como se muestra en la siguiente figura:

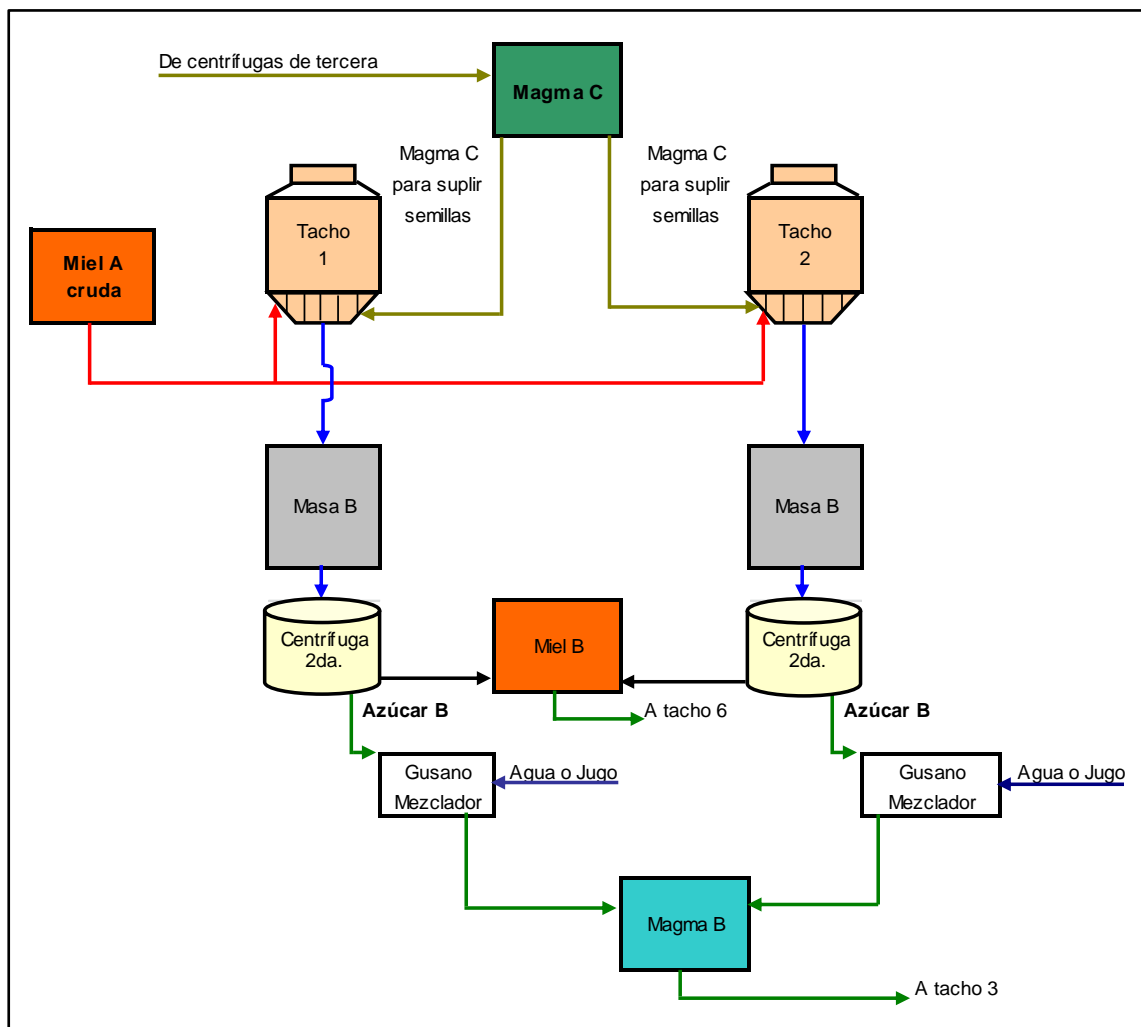
Figura 8. Obtención de azúcar cruda y miel A



Fuente: elaboración propia.

La miel A es utilizada en los tachos uno y dos para obtener masa B. En los tachos uno y dos también se utilizan semillas a inicio de zafra. La masa B obtenida es enviada a las centrífugas continuas de segunda, donde se obtiene magma B y miel B. Puede verse la siguiente figura:

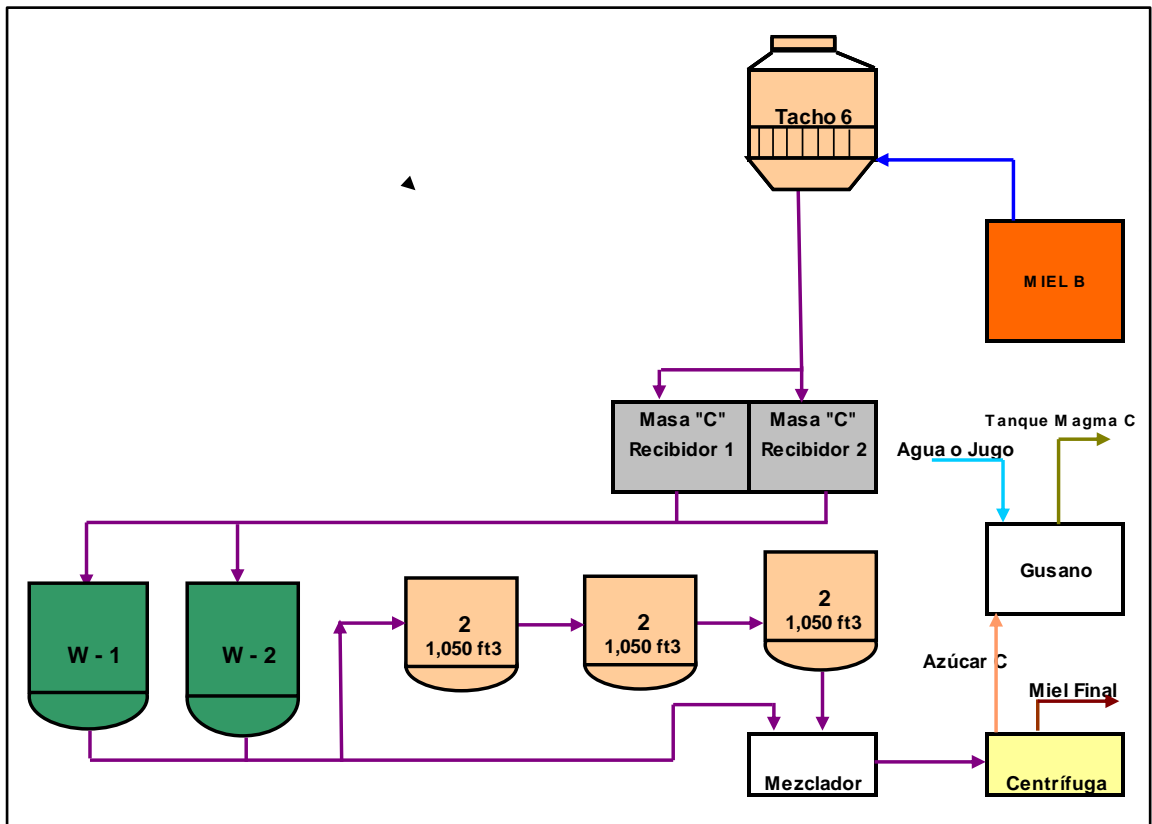
Figura 9. Obtención de miel B y magma B



Fuente: elaboración propia.

La miel B es utilizada en el tacho seis para hacer masa C y el magma B es utilizado en el tacho tres para suplir las semillas. La masa C que se obtiene del tacho seis se envía al cristalizador *Werkspoor* para el agotamiento de la masa, seguidamente es enviada a las centrífugas continuas de C, para obtener magma C y melaza (miel final). Puede verse la siguiente figura:

Figura 10. **Obtención de magma C y melaza**



Fuente: elaboración propia.

El magma C se utiliza en los tachos uno y dos para suplir las semillas, y la melaza se almacena en un tanque para la venta (utilizada para la fabricación de alcohol).

El objetivo de hacer las tres clases de masas es agotar las mieles para obtener melaza con bajo porcentaje de sacarosa. Todos los tachos trabajan al vacío y utilizan vapor de los gases uno, provenientes de los preevaporadores.

Para producir azúcar blanca, la meladura proveniente de los evaporadores después de ser calentada y clarificada pasa en tres torres de sulfitación en contracorriente, con dióxido de azufre gaseoso para reducir químicamente sus agentes colorantes. Para su cristalización se utilizan los tachos 7, 8, 9, 10 y 11, y como materia prima se utiliza meladura clarificada y sulfitada.

1.8.1.8. Centrifugación o purga

La masa cocida proveniente de los cristalizadores (tachos) pasa a las centrífugas donde se le remueve el licor madre (miel) de los cristales de azúcar que se quedan atrapados en las paredes laterales perforadas, y dicho licor pasa a través de ellas debido a la fuerza centrífuga. Durante este proceso los cristales de azúcar son lavados (el lavado se realiza dos veces; de 1 a 2 segundos para azúcar crudo y de 7 a 8 segundos para azúcar blanco) para retirar los residuos de miel. La miel vuelve a los tachos; el azúcar, si es crudo, se envía directamente al empacado, mientras que si es blanco, pasa al proceso de secado y enfriado para luego ser empacado. El empacado del azúcar se realiza en sacos de jumbo. Finalmente es enviado a Dacsa (empacadora de ASAZGUA) por lotes de producción para su posterior comercialización.

1.8.2. Proceso para la producción de energía eléctrica

Uno de los aspectos que ha tomado relevancia en estos últimos años es la producción de energía eléctrica. Central Agro Industrial Guatemalteca, S. A., es uno de los ingenios que se dedica a dicha producción, llevándose a cabo en el

departamento de cogeneración. A continuación se presenta un resumen del proceso para obtener energía eléctrica.

1.8.2.1. Generación de vapor

El bagazo que se obtiene después de la extracción de jugo de la caña de azúcar en los molinos se transporta en sistemas de conductores de banda y de tablillas, hacia las calderas de tipo acuotubular, para usarlo como combustible.

Estas calderas son alimentadas con agua desmineralizada proveniente de pozos, tratada en ósmosis inversa y pulida en un desionizador o desmineralizador. Esta agua es tomada del desaireador mediante unas bombas que la inyectan al domo superior de las calderas y posteriormente se distribuye dentro de las tuberías pasando por el banco principal, *superheater* de convección y de radiación, hasta llegar al componente conocido como cabezal de salida, ya convertido en vapor sobrecalentado que luego es llevado a los turbogeneradores. El agua, para transformarse en vapor durante su circulación dentro de las tuberías, recibe un intercambio de calor por radiación y convección, debido a la flama del fuego y contacto de los gases de combustión con los tubos.

La combustión se realiza en el hogar de las calderas, agregando lo siguiente: oxígeno, al absorber aire del ambiente por medio del ventilador de tiro forzado; calor y combustible, mediante las brasas obtenidas al quemar leñas apiladas que funcionan como combustible de ignición inicial, ya que posteriormente se alimenta con proporciones adecuadas de bagazo para producir más calor hasta generar el vapor que se necesita para producir energía eléctrica en los turbogeneradores.

Para tener una óptima combustión del combustible en el hogar de las calderas, este debe permanecer una cantidad de tiempo suficientemente alta y se debe mezclar de forma efectiva con el oxígeno (aire). Para ayudar al combustible a permanecer más tiempo en el hogar, muchas calderas utilizan sistemas de aire sobre fuego o también llamado OFA (*OverFire Air*), que tienen la función de crear turbulencia en el hogar ayudando así a cumplir dicho objetivo. También se utiliza un ventilador de tiro inducido para la extracción de los gases de combustión hacia la chimenea. Este está programado para mantener la presión en el hogar de las calderas de -0,1 a 0 pulgadas de agua.

1.8.2.2. Turbogeneradores

El vapor sobrecalentado generado en las calderas tiene una presión y temperatura muy altas. Este se conduce por tuberías hacia las turbinas de vapor. Estas son máquinas que transforman la energía interna del vapor en energía mecánica, mediante un complejo sistema de álabes que transforman la energía cinética del vapor y lo transfieren al eje en forma de rotación que atraviesa la turbina, que está acoplada al generador síncrono, transformando la energía mecánica (rotación) del eje en energía eléctrica. El principio de funcionamiento de un generador síncrono consiste en la excitación de flujo en el rotor.

Con el objetivo de aprovechar la energía que contiene el vapor, las turbinas tienen varios cuerpos, alta presión, presión intermedia y baja presión, donde el vapor, al pasar por cada uno de ellos, pierde presión al expandirse. El vapor con alta presión y temperatura proveniente de la caldera, al entrar a la turbina es guiado directamente a través del componente de alta presión y pierde potencia conforme va chocando con las diferentes ruedas de álabes, haciéndolas girar ya que van unidas a un eje que atraviesa la turbina, en donde

la energía cinética del vapor se transforma en energía mecánica recibida en los álabes.

En una turbina *condensing* o condensadora, el vapor, después de pasar por la turbina, se descarga al interior de un condensador a una presión bastante inferior a la atmosférica, transformando el vapor nuevamente en agua (mediante un choque térmico por medio de agua tomada de las torres de enfriamiento) para ser utilizada nuevamente en las calderas. En una turbina de escape, el vapor, después de pasar por la turbina, sale a una presión de 20 psi, y es enviado a fábrica para calentar y concentrar los jugos, mieles y masas en el proceso de fabricación de azúcar. Después de este proceso se aprovechan los condensados que se generan en los preevaporadores, ya que son útiles para utilizarlos nuevamente en las calderas.

1.8.2.3. Subestación eléctrica

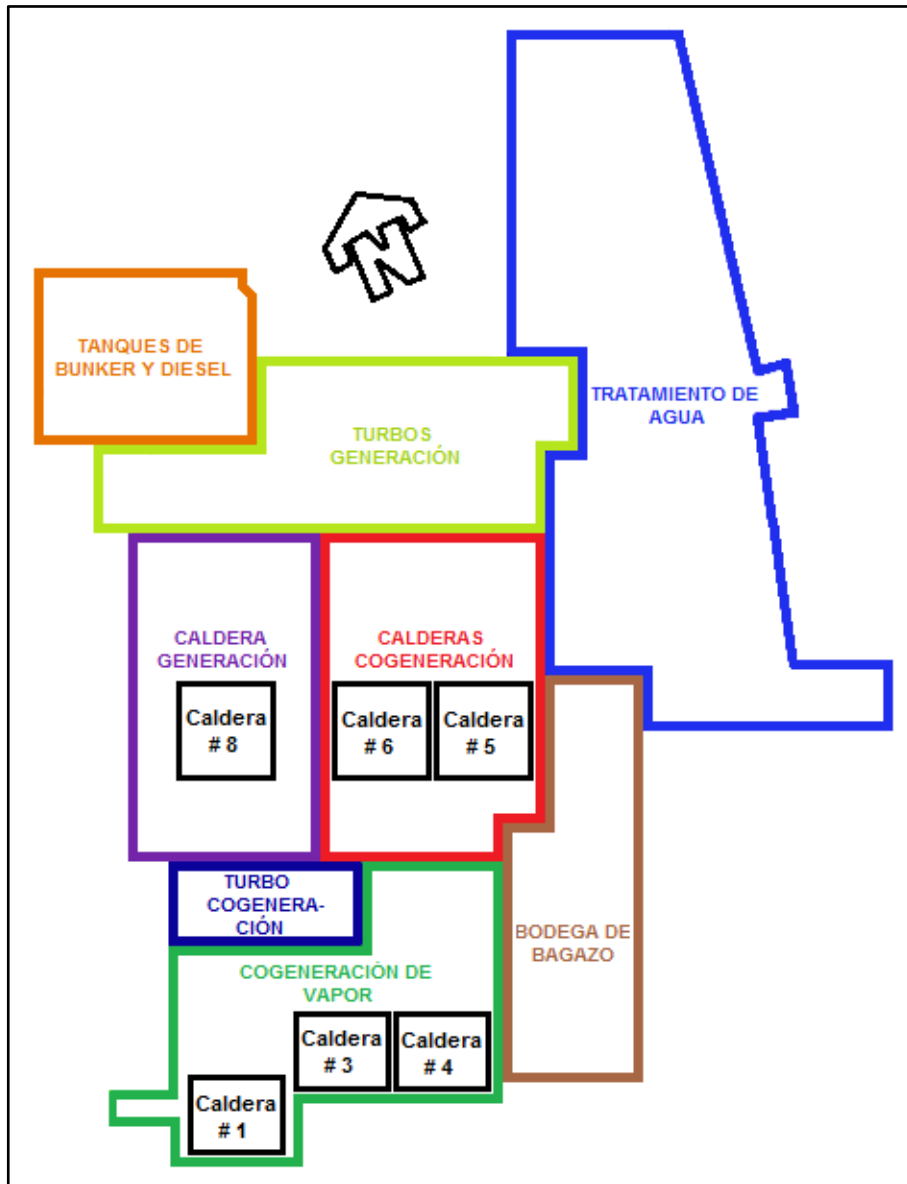
La energía eléctrica producida en los generadores se conduce a los transformadores de potencia, los cuales se encargan de elevar la tensión (voltaje) de 13,8 kV a 69 kV, para después ser transportada a través de los cables de transmisión a la subestación situada en el ingenio Pantaleón, y luego ser distribuida a los usuarios donde lo requiera EEGSA, con la que se tiene un contrato de entrega.

2. FASE DE INVESTIGACIÓN

2.1. Generadores de vapor

Ingenio Madre Tierra cuenta actualmente con seis calderas, ubicadas en el departamento de cogeneración, todas de tipo acuotubular divididas en tres grupos (baja presión, mediana presión y alta presión). Las calderas: # 1, # 3, y # 4 son de baja presión, de 250 psi cada una; las calderas: # 5 y # 6 son de mediana presión, de 650 psi y 850 psi respectivamente; y la caldera # 8 es de alta presión, de 1 250 psi, y no hace mucho tiempo que se montó, iniciando su operación en la zafra 2011-2015. Todas las calderas están ubicadas en el departamento de cogeneración. Pueden verse en la figura de la siguiente página:

Figura 11. **Ubicación de calderas**



Fuente: elaboración propia.

En las calderas de tipo acuotubular, el agua se desplaza por el interior de los tubos, la flama de la combustión del hogar y los gases calientes se encuentran en contacto con las caras exteriores de ellos, haciendo que el agua se evapore.

Las calderas de baja presión y la caldera de 850 psi están diseñadas para quemar únicamente bagazo de caña de azúcar. Las otras dos calderas (calderas # 5 y # 8) están diseñadas para quemar bagazo y/o bunker C. El agua que alimenta a las calderas para la generación de vapor es tomada de unos pozos; antes pasa a un sistema de tratamiento para eliminarle sólidos en suspensión, sólidos disueltos, dureza y sílice, con el objetivo de evitar incrustaciones y corrosión en las tuberías de las calderas.

La combustión producida en el hogar de las calderas genera gases a una temperatura muy alta y, al tener contacto con los tubos o serpentines con agua, se produce un intercambio de calor, transformando el agua en vapor. En las calderas # 5 y # 8 los gases calientes, antes de salir por la chimenea, pasan por un sistema de lavado para captar todas las partículas no quemadas del combustible.

2.1.1. Combustibles

El combustible es uno de los principales componentes en una reacción de combustión, y no es más que el material oxidable o material que puede quemarse. Los dos elementos útiles de un combustible son: carbono (C) e hidrógeno (H). En el ingenio, los dos tipos de combustibles utilizados en las calderas son: bagazo y bunker C, siendo el primero subproducto de la caña de azúcar y el de mayor uso.

2.1.1.1. Bagazo de caña de azúcar

El bagazo es el combustible más utilizado en las calderas, es un subproducto de la caña de azúcar. El poder calorífico bruto típico del bagazo en condiciones secas es de aproximadamente 8 000 BTU/lb (18 600 kJ/kg) medido

en un calorímetro de bomba de laboratorio. Este valor puede ser menor si el bagazo presenta impurezas.

Sin embargo, el bagazo contiene partes inertes o impurezas sin poder calorífico (no se queman). Estas partes inertes pueden ser arena, tierra, rocas, entre otras, las cuales se mezclan con el bagazo disminuyéndole el poder calorífico y aumentando la carga de cenizas en la caldera. La humedad es otro factor que reduce el poder calorífico bruto, debido a que la humedad no libera calor.

Según análisis realizados en el laboratorio de control de calidad del ingenio, el bagazo que se recibe de la molienda tiene un poder calorífico de aproximadamente 4 000 BTU/lb (9 300 kJ/kg), con humedades de 48 % a 51 %, y cenizas inertes de aproximadamente 8 %.

2.1.1.2. Bunker C

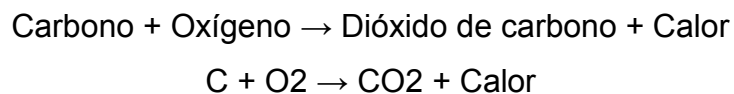
El bunker C o *fuel oil* núm. 6 es otro de los combustibles utilizados en las calderas del ingenio. Es un aceite denso y viscoso producido por la mezcla de aceites residuales pesados con un aceite más ligero (a menudo con *fuel oil* No. 2) para cumplir con las especificaciones de viscosidad y punto de fluidez.

En ingenio Madre Tierra, el bunker C es un combustible alternativo que se inyecta de forma atomizada al hogar de la caldera por medio de quemadores; generalmente se utiliza cuando no se cuenta con el combustible bagazo de caña de azúcar por diversos problemas que pueden suceder en su proceso de molienda, en su transportación (conductores) y otros.

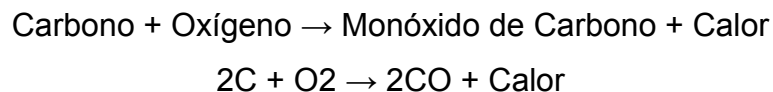
El bunker C, antes de inyectarse en el hogar de las calderas, se precalienta en un intercambiador de calor donde se hace pasar vapor a 750 °F de temperatura, obteniéndose dicho combustible a 160 °F, donde luego se envía a los quemadores. Dicho combustible suele contener asfáltenos, los cuales hacen indispensable su atomización para encenderlo. Su poder calorífico es de aproximadamente 150 000 BTU/gal.

2.1.2. Combustión

La combustión o reacción completa del carbono con el oxígeno en el aire forma dióxido de carbono (CO₂) y libera calor. La reacción se expresa mediante la siguiente ecuación:



Si no se realiza de manera adecuada la combustión (por ejemplo si la temperatura es muy baja, el tiempo de residencia del combustible es demasiado corto o la mezcla de aire y combustible es insuficiente), el resultado será una combustión incompleta, que lleve a la formación de monóxido de carbono (CO) y partículas de combustibles no quemadas muy calientes. La reacción incompleta de carbono con oxígeno se representa mediante la ecuación:



Una combustión incompleta libera sustancialmente menos calor que una combustión completa. La combustión incompleta, además de la pérdida de

calor, genera particulado que descarga al medio ambiente cuando los gases salen de la chimenea.

Algunos de estos componentes se encuentran generalmente en pequeñas cantidades, como el SO₂, NO_x y CO, principales contaminantes atmosféricos. En la tabla I se presenta un resumen de los productos típicos de la combustión del bagazo. Debe tenerse en cuenta que 1 % por volumen corresponde a 10 000 partes por millón (ppm).

Tabla I. **Productos gaseosos típicos de la combustión del bagazo de caña de azúcar**

| Gases de combustión | Cantidad |
|--|-----------|
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 15% a 18% |
| Monóxido de carbono (CO) | < 400 ppm |
| Vapor de agua (H ₂ O) | 20% a 25% |
| Dióxido de azufre (SO ₂) | < 10 ppm |
| Oxígeno (O ₂) | 3% a 5% |
| Nitrógeno (N ₂) | 60% a 65% |
| Óxidos de nitrógeno (NO _x) | < 140 ppm |

Fuente: Jansen Combustion and Boiler Technologies, Inc. <http://jansenboiler.com/>. Consulta: 17 de enero de 2015.

Las calderas que queman biomasa, en general funcionan con más aire del que se necesita en teoría para que se produzcan las reacciones químicas. Esta cantidad de aire se denomina exceso de aire. Generalmente requieren entre 20 % a 40 % de exceso de aire para lograr conseguir una combustión completa, pero los combustibles (bagazo y bunker C), por cuestiones principalmente de

humedad, no llegan a combustionar completamente y, por tal razón, los gases salen acompañados de cenizas y otras partículas inertes son descargadas al medio ambiente. Debido a eso, dos de las tres calderas de alta presión del ingenio ya cuentan con sistemas de lavadores de gases de combustión.

2.2. Lavadores de gases de combustión (*scrubber*)

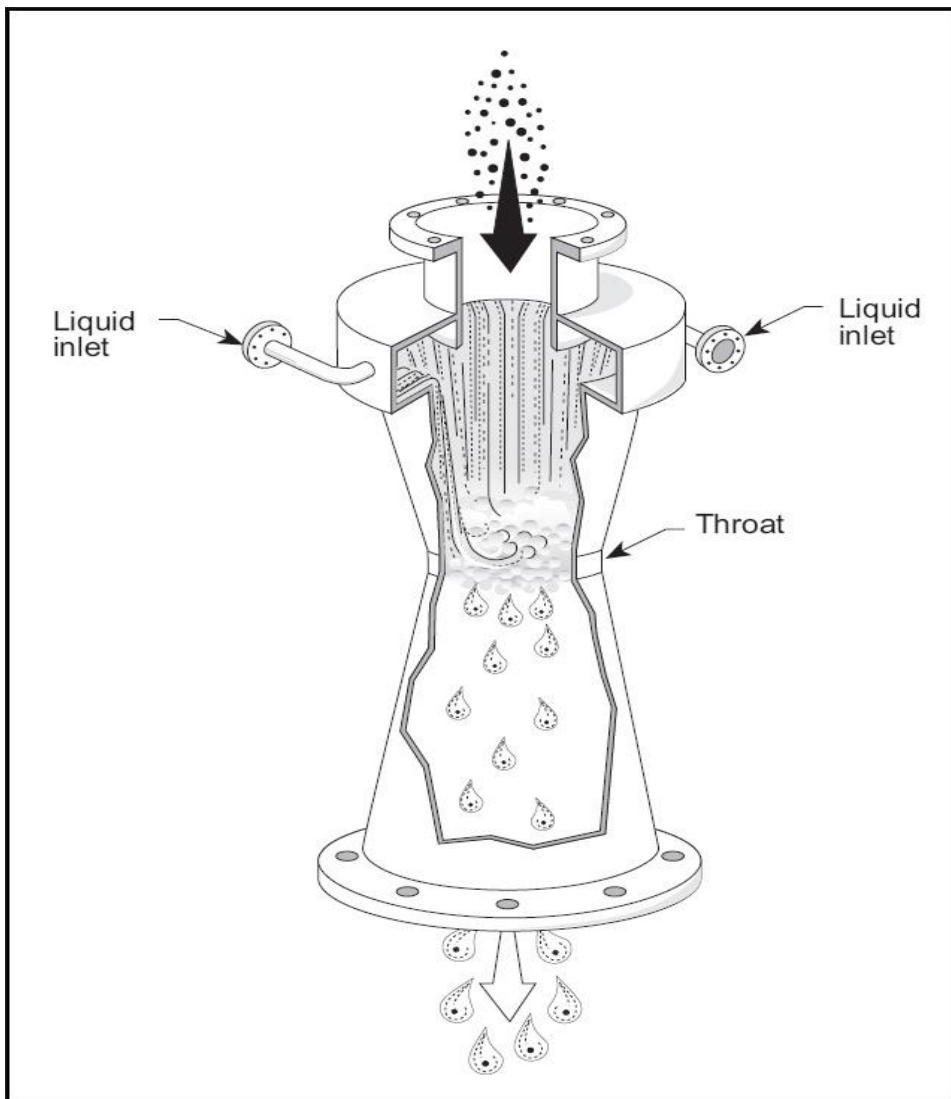
Los lavadores de gases son sistemas que por medio de agua atrapan la mayor cantidad de partículas no quemadas (cenizas) presentes en los gases de combustión, evitando que estos sean entregados al medio ambiente. Las calderas que cuentan con lavadores del ingenio y la generadora son de tipo *venturi* de alta presión, y se componen de tres secciones: una sección convergente, una sección de garganta y una sección divergente.

La corriente de los gases de combustión entra en la sección convergente y, como el área disminuye, los gases se aceleran a una velocidad suficiente como para impactar y atomizar el agua que se le inyecta; y, en la sección divergente, el área aumenta, y por lo tanto la velocidad de los gases vuelve a disminuir (de acuerdo con la ecuación de Bernoulli). Los sistemas de limpieza de gases vía húmeda (lavadores de gases) son de concepción simple, bajo costo de inversión y presentan gran eficiencia de limpieza de los gases. Estos tipos de lavadores atrapan partículas < 10 micrones.

El diseño del sistema varía dependiendo de la cantidad de flujo, temperatura y humedad de los gases, ya que la garganta puede ser circular o rectangular, y el agua puede ser inyectada mediante unas boquillas aspersoras en la sección convergente, en la garganta o en ambas secciones.

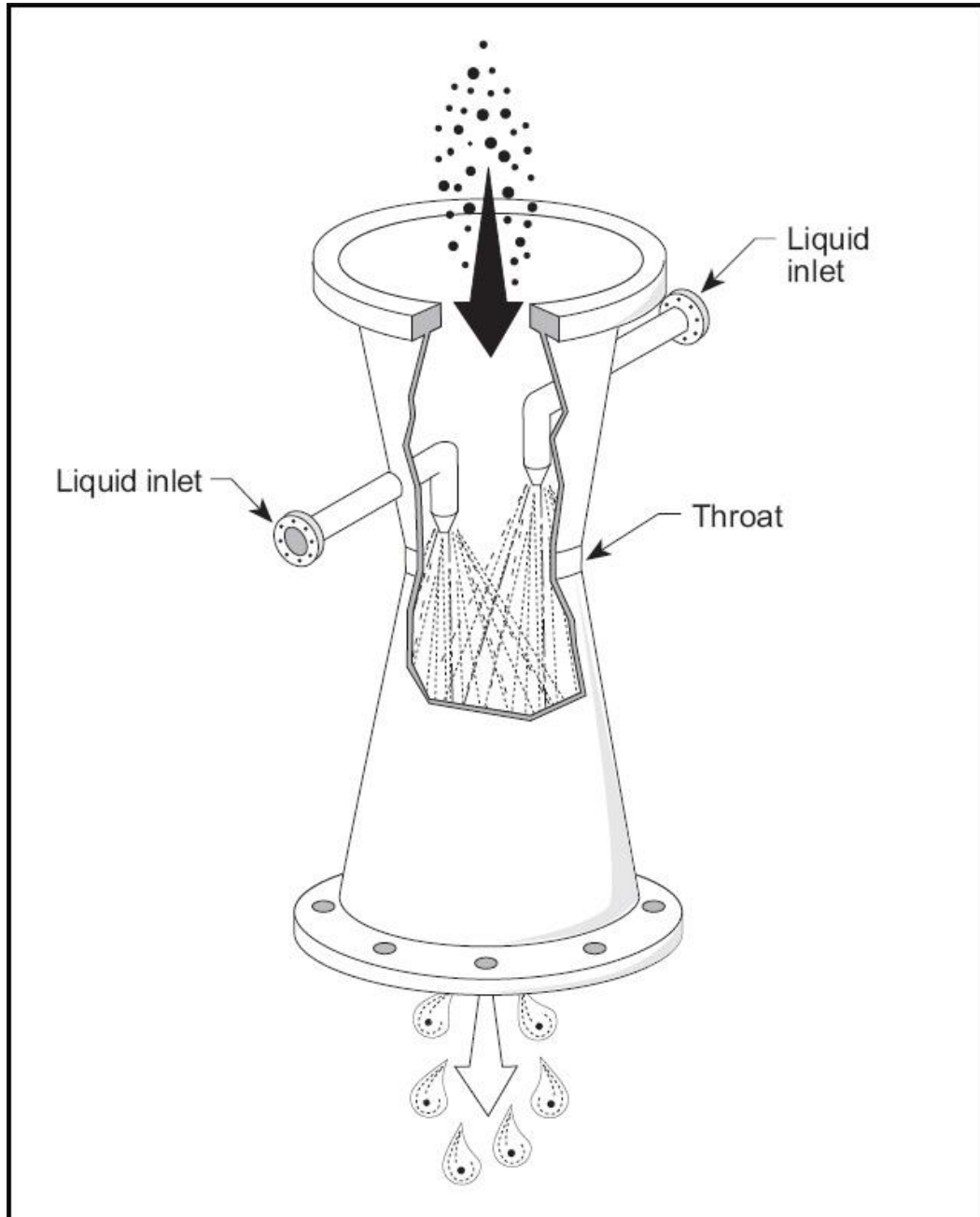
En la figura 12 se muestra un *venturi* con la inyección de agua en la sección convergente, y en la figura 13 se muestra un *venturi* con la inyección de agua en la garganta.

Figura 12. **Venturi con inyección de agua en la sección convergente**



Fuente: *Venturi scrubber*. https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_scrubber. Consulta: 25 de octubre de 2014.

Figura 13. **Venturi** con la inyección de agua en la garganta



Fuente: *Venturi scrubber*. https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_scrubber. Consulta: 25 de octubre de 2014.

2.3. Estudio ambiental

La normativa nacional basada en las guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad de la Corporación Financiera Internacional (IFC), miembro del Grupo del Banco Mundial, hace referencia a los límites máximos permisibles de emisiones en instalaciones de combustión. En la siguiente tabla se definen los límites máximos de emisión.

Tabla II. **Límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para instalaciones de combustión**

| Contaminante | Límite máximo | Unidad ^[1] |
|---|---------------|-----------------------|
| Material particulado (MP) | 50 | mg/Nm ³ |
| Dióxido de azufre (SO ₂) | 2 000 | mg/Nm ³ |
| Óxido de nitrógeno (NO _x) | 650 | mg/Nm ³ |
| ^[1] mg/m ³ : miligramos por metro cúbico, en condiciones normales (1 atm de presión y 0 °C de temperatura). | | |

Fuente: *Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad*. <http://www.ifc.org/>.

Consulta: febrero de 2015.

Para cumplir con la normativa del Banco Mundial, hasta el momento las calderas # 5 y # 8 (ver figura 11) son las que ya están equipadas con lavadores de gases de combustión que evitan que las partículas no quemadas presentes en los gases sean entregadas al ambiente.

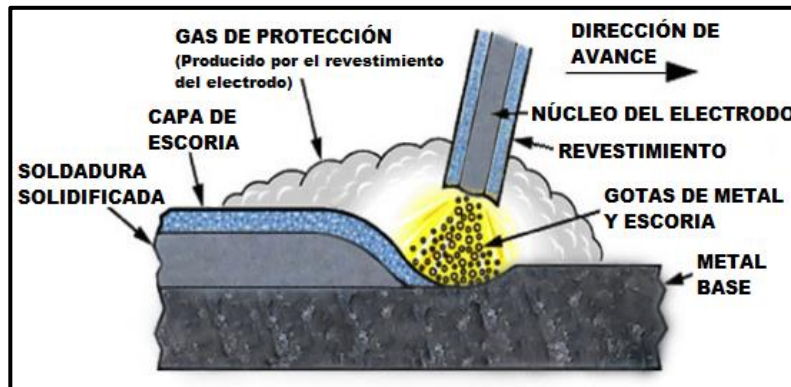
2.4. Conceptos básicos

2.4.1. Soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido

La soldadura es un proceso de fabricación por medio del cual se realiza la unión de dos o más materiales (metales o termoplásticos) lograda a través de la coalescencia (fusión), en la cual, por acción del calor, los metales pasan del estado sólido al estado líquido con o sin aportación de material, formando un charco de material fundido entre las piezas a soldar que, al enfriarse, se convierte en una unión fija a la que se le denomina cordón. La soldadura de tipo manual por arco eléctrico con electrodo revestido es también conocida como SMAW, por su significado en inglés: *Shielded Metal Arc Welding* (soldadura por arco metálico protegido). Se trata de un sistema de bajo costo, de fácil y rápida utilización, con resultados perfectos, y se utiliza ampliamente en la construcción de estructuras metálicas y en la fabricación industrial.

Este es el tipo de soldadura utilizada para la construcción de elementos que componen el sistema de tratamiento de agua con cenizas. En el proceso de soldadura SMAW se utiliza una varilla de electrodo consumible de acero, cubierta con un fundente que protege el área de la soldadura contra la oxidación y la contaminación, por medio de la producción del gas CO₂ durante el proceso de la soldadura. Resulta útil ver la imagen de la siguiente página.

Figura 14. **Proceso de soldadura SMAW**



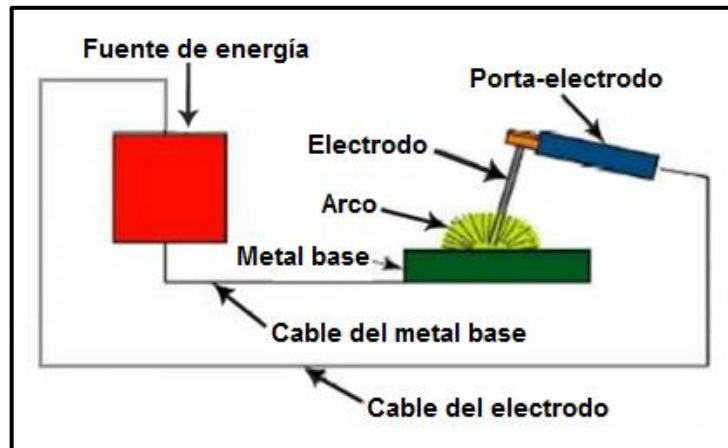
Fuente: FLORES, Carlos. *Soldadura al arco eléctrico(SMAW)*.

http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_08_MEC01.pdf. Consulta: 15 de enero de 2015.

Mediante una corriente eléctrica, se forma un arco eléctrico entre el electrodo y los metales a unir, produciendo la fusión de este y su depósito por la unión soldada. La intensidad y la tensión adecuadas para la operación de soldeo se obtienen mediante un transformador. Se pueden obtener diversas tensiones, por medio de diferentes sistemas aplicados al secundario, adecuando la potencia del arco al tamaño de las piezas a soldar. Al ponerse en contacto los polos opuestos de un generador se establece una corriente eléctrica de gran intensidad.

Antes de iniciar el trabajo se soldadura se deben fijar las piezas sobre una mesa o banco de trabajo, de manera que permanezcan inmóviles a lo largo de todo el proceso. El equipo se compone básicamente de una fuente de poder, portaelectrodo y cable de fuerza. En la figura 15 puede observarse el equipo básico de la soldadura SMAW.

Figura 15. **Equipo básico de soldadura con arco eléctrico (SMAW)**



Fuente: *Equipo SMAW*.<http://www.teminsa.com/blog/wp-content/uploads/2014/12/Electrodo-Equipo-de-Soldadura.jpg>. Consulta: marzo de 2015.

Existen dos tipos de electrodos: el electrodo desnudo y el electrodo revestido. El electrodo desnudo (sin revestimiento) es un alambre estirado o laminado. Su uso es limitado por la alta absorción de oxígeno y nitrógeno del aire y por la inestabilidad de su arco. El electrodo revestido, por su parte, está constituido por un núcleo metálico y un revestimiento a base de sustancias químicas. Tiene un extremo no revestido para fijarlo en el portaelectrodo. El núcleo es la parte metálica del electrodo que sirve como material de aporte. Su composición química varía a su selección y se hace de acuerdo al material de la pieza a soldar. El revestimiento es un material que está compuesto por distintas sustancias químicas. Tiene las siguientes funciones:

- Facilita el encendido del arco y lo mantiene estable.
- Facilita la soldadura en diversas posiciones de ejecución del soldeo.

- Crea gases que protegen las gotas de metal fundido contra la acción perjudicial del oxígeno y nitrógeno del aire atmosférico.
- Forma una capa de escoria sobre el metal fundido, evitando el enfriamiento brusco, lo protege contra la oxidación y favorece el modelado del metal fundido dando al cordón una forma uniforme.

La fabricación del núcleo de los electrodos proviene de un acero de característica efervescente y de bajo contenido de carbono; esto significa que es fundido sin la adición de desoxidantes.

2.4.1.1. Electrodo revestido para soldar aceros al carbono

La norma AWS A5.1/A5.1M (Especificación para Electrodo de Acero al Carbono para Soldadura por Arco Metálico Protegido), clasifica al electrodo de la forma EXXYY, como se describe a continuación: la letra E designa un electrodo; las letras XX indican la resistencia a la tracción mínima en ksi (1 ksi = 1 000 psi) del metal de soldadura depositado; por ejemplo: E70YY, indica un electrodo revestido cuyo depósito posee una resistencia mínima de 70 000 psi y, seguidamente, la primera letra Y indica las posiciones adecuadas de la soldadura en la que el electrodo puede utilizarse, como se describe en la siguiente tabla:

Tabla III. **Posiciones para soldar, según el tipo de electrodo**

| CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS AWS | POSICIONES DE SOLDADURA |
|---------------------------------|---|
| EXX1Y | Planas, verticales, horizontales y sobrecabeza. |
| EXX2Y | Planas y filetes horizontales. |
| EXX3Y | Es un término antiguo que ya no se utiliza; su posición era sólo plana. |
| EXX4Y | Planas, horizontales, sobrecabeza y verticales hacia abajo. |

Fuente: *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. Norma AWS A5.1/A5.1M:2012. Consulta: marzo de 2015.

Y, por último, para describir el tipo de revestimiento del electrodo y el tipo de corriente adecuada para el mismo, se debe tomar como base tanto la primera como la segunda letra Y, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Tipo de revestimiento y de corriente de electrodos**

| CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS AWS | TIPO DE REVESTIMIENTO | TIPO DE CORRIENTE |
|---------------------------------|--|-------------------|
| EXX10 | Sodio de alta celulosa | DCEP |
| EXX11 | Potasio de alta celulosa | AC o DCEP |
| EXX12 | Sodio, alto en titanio | AC o DCEN |
| EXX13 | Potasio, alto en titanio | AC, DCEP, o DCEN |
| EXX14 y EXX24 | Polvo de hierro, titanio | AC, DCEP, o DCEN |
| EXX15 | Sodio bajo en hidrógeno | DCEP |
| EXX16 | Potasio bajo en hidrógeno | AC o DCEP |
| EXX18, EXX28 y EXX48 | Potasio de bajo hidrógeno, hierro en polvo | AC o DCEP |
| EXX19 | Óxido de hierro, titanio, potasio | AC, DCEP, o DCEN |
| EXX20 | Alto en óxido de hierro | AC, DCEP, o DCEN |
| EXX22 | Alto en óxido de hierro | AC o DCEN |
| EXX27 | Alto en óxido de hierro, hierro en polvo | AC, DCEP, o DCEN |

AC: Corriente Alterna
DCEP: Corriente Directa, Electrodo Positivo (Polaridad inversa).
DCEN: Corriente Directa, Electrodo Negativo (Polaridad directa).

Fuente: *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. Norma AWS A5.1/A5.1M:2012. Consulta: marzo de 2015.

Con base en el ejemplo anterior (E70YY), se plantea este otro: un electrodo E7018del que se indica: depósito de soldadura que posee una resistencia mínima de 70 000 psi; posiciones de soldadura planas, verticales, horizontales y sobrecabeza (véase tabla III); revestimiento de potasio de bajo hidrógeno y hierro en polvo (véase tabla IV), y se debe utilizar corriente alterna o corriente directa con electrodo positivo (véase tabla IV).

En la realización del proyecto se utilizaron electrodos de las clasificaciones E7018 y E6011.

2.4.2. Bombas hidráulicas

Son máquinas que transforman la energía mecánica con la que es accionada la energía del fluido incompresible que incluye presión, velocidad o altura. La principal clasificación de bombas, que se definen por su modo fundamental de operación, es:

2.4.2.1. Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas

El principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. Este tipo de bombas se subdividen principalmente en: alternativas o reciprocantes y rotativas. Entre algunos ejemplos de bombas volumétricas reciprocantes se pueden mencionar la bomba de pistón y la bomba de membrana o diafragma. Y entre algunos ejemplos de bombas volumétricas rotativas se pueden mencionar la bomba de tornillo o de cavidad progresiva, la bomba de engranajes, la bomba de paletas y la bomba de lóbulos.

Las bombas de desplazamiento positivo reciprocantes son aplicables para gastos pequeños, presiones altas y líquidos limpios. Las bombas de desplazamiento positivo rotatorias son aplicables para gastos pequeños y medianos, presiones altas y líquidos viscosos. En el sistema de tratamiento de agua con cenizas se utilizarán bombas de cavidad progresiva para el bombeo de floculante en solución. La bomba de cavidad progresiva utiliza un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa y hace fluir el líquido entre el tornillo y esta.

2.4.2.2. Bombas roto-dinámicas

El principio de funcionamiento de estas está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo y se subdividen principalmente en: radiales o centrífugas y axiales. Las bombas roto-dinámicas son clasificadas según diferentes criterios:

Según la trayectoria del líquido en el impulsor:

- Bomba de flujo radial o bomba centrífuga: el fluido entra axialmente en el impulsor y es descargado radialmente.
- Bomba de flujo axial: el fluido entra y sale del impulsor en forma axial.
- Bomba de flujo mixto: el fluido entra axialmente en el impulsor y es descargado en una dirección intermedia entre la radial y la axial.

Basándose en el tipo de impulsor:

- Bombas de impulsor abierto: los álabes del impulsor son libres en ambas caras y están unidos directamente al núcleo del impulsor.

- Bombas de impulsor cerrado: el impulsor está constituido por dos discos paralelos que encierran totalmente las vías de agua.
- Bombas de impulsor semiabierto: los álabes del impulsor son libres en una de las caras y fijados en la otra por un disco.

Por la forma de succión del líquido:

- Bomba de simple succión: admite agua por un solo orificio de succión (en un lado del impulsor).
- Bomba de doble succión: admite agua por ambos lados del impulsor.

De acuerdo al número de etapas o impulsores

- Bomba de una etapa: tiene un único impulsor.
- Bomba de dos o más etapas: tiene dos o más impulsores instalados en serie, con la descarga de uno haciéndose en la succión del siguiente.

De acuerdo a la posición de la bomba:

- Bomba de eje horizontal: es la más común y de aplicación muy diversa.
- Bomba de eje vertical: puede ser no sumergida, en donde el motor puede estar por encima de la bomba; y sumergida, que elimina el inconveniente del cebado, por lo tanto la bomba está en disposición de funcionar en cualquier momento.

Cabe destacar que las bombas axiales no son bombas centrífugas, pero tienen los mismos principios de funcionamiento. Las bombas roto-dinámicas del tipo centrífugo son aplicables para gastos grandes, presiones reducidas o medianas, y líquidos de todo tipo, excepto viscosos. Para líquidos de alta

viscosidad las bombas de desplazamiento positivo resultan más económicas para esta aplicación. En caso particular, en el sistema de tratamiento de agua con cenizas se utilizarán bombas centrífugas para el bombeo de agua sucia (agua con cenizas) y agua limpia.

Una bomba centrífuga es una máquina hidráulica rotativa que transforma la energía mecánica de su impulsor en energía cinética o de presión del fluido, que entra por el centro del rodete y que dispone de unos álabes para conducir el fluido y, por efecto de la fuerza centrífuga, es impulsado hacia la carcasa o cuerpo de la bomba y luego hacia el exterior. Es importante saber que el funcionamiento de una bomba centrífuga en vacío puede estropear el sellado de la bomba, debido a una deficiente refrigeración, dado que no circula fluido por su interior que ayude a mejorar la disipación del calor producido por la bomba.

2.4.3. Selección de bombas hidráulicas

La clave para hacerla selección correcta de una bomba radica en el conocimiento del sistema en que trabajará la bomba. Al seleccionar una bomba para una aplicación específica se deben considerar los factores siguientes:

- Naturaleza del líquido a bombear.
- Capacidad requerida (flujo volumétrico).
- Condiciones del lado de succión de la bomba.
- Condiciones del lado de descarga de la bomba.
- Altura o carga dinámica total de la bomba.
- Tipo de sistema donde la bomba impulsa el fluido.
- Tipo de fuente de potencia (motor eléctrico, motor de combustión, turbina de vapor y demás).

- Limitaciones de espacio, peso y posición.
- Condiciones ambientales.
- Costo de adquisición e instalación de la bomba.
- Costo de operación de la bomba.

La naturaleza del fluido se caracteriza por su temperatura y condiciones de bombeo, gravedad específica, viscosidad y tendencia a corroer o erosionar las partes de la bomba. Después de seleccionar esta debe especificarse lo siguiente:

- Tipo de bomba y su fabricante.
- Tamaño de la bomba.
- Tamaño de la conexión de succión y su tipo (bridada, atornillada y otras).
- Tamaño y tipo de la conexión de descarga.
- Velocidad de operación.
- Especificaciones para el impulsor (por ejemplo, para un motor eléctrico: potencia que requiere, velocidad, voltaje, fase, entre otros).
- Tipo de acoplamientos, fabricante y número de modelo.
- Detalles de montaje.
- Diseño y materiales del sello del eje.

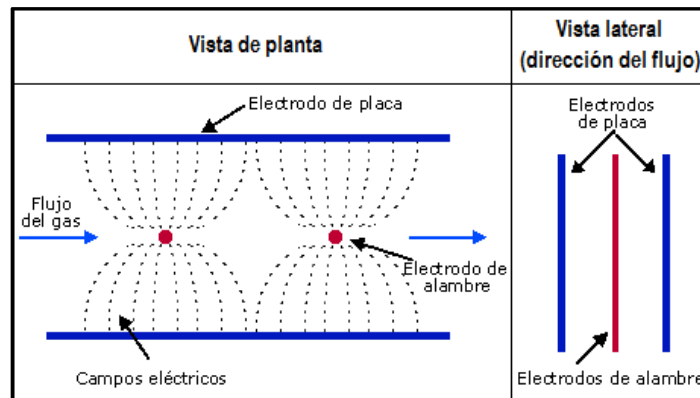
Los catálogos de las bombas y los representantes del fabricante proporcionan la información necesaria para seleccionar la que más se adapte a las necesidades tanto físicas como económicas.

2.4.4. Limpieza de gases mediante un precipitador electrostático

Este sistema es otra alternativa, muy eficiente para la limpieza de gases. Es característico en las centrales térmicas que utilizan carbón como combustible. El precipitador electrostático o electrofiltro es un dispositivo que se utiliza para atrapar partículas mediante su ionización, dispersas dentro de una fase gaseosa, a través de la aplicación de un campo magnético. La unidad se compone de una serie de placas o electrodos colectores verticales, y electrodos de descarga que se encuentran entre cada dos electrodos de descarga consecutivos (por donde circulan los gases).

El campo eléctrico se establece entre electrodos colectores que están conectados a tierra con polaridad positiva, y electrodos de descarga conectados a una fuente eléctrica de alta tensión de corriente directa con polaridad negativa. Las partículas contenidas en el flujo de gases al pasar por los electrodos de descarga se cargan negativamente gracias al principio de ionización, en el cual posteriormente son atraídas por los electrodos colectores, quedando adheridas al mismo debido a las distintas cargas eléctricas, para posteriormente ser depositadas en las tolvas situadas en la parte inferior. Es útil observar la figura de la página siguiente.

Figura 16. Diagrama esquemático de un precipitador electrostático



Fuente: *Precipitador*

electrostático.http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/imagenes/fig45.gif. Consulta: marzo de 2015.

Algunas partículas tienen dificultades para adquirir la carga eléctrica, por lo que se requiere una fuente energética de alto voltaje. Otras se cargan con facilidad y se dirigen rápidamente hacia los electrodos colectores, pero también pueden perder fácilmente su carga eléctrica, por lo que es necesario volver a recargar y recolectar. La precipitación electrostática es típicamente un proceso seco en donde las partículas caen de las placas de captación debido a la fuerza de gravedad, y generalmente con ayuda de vibradores o golpeteos; pero el rociar de agua ayuda al flujo entrante a recoger partículas excepcionalmente finas. Además, ayuda a reducir la resistencia eléctrica del material seco entrante para hacer el proceso más efectivo.

Un precipitador electrostático húmedo combina el método operacional de un depurador mojado con el de un precipitador electrostático para hacer autolimpieza o autolavado incluso con un dispositivo de alto voltaje. Un problema de este sistema está relacionado con la resistividad de las partículas.

Figura 17. **Precipitador electrostático**



Fuente: *Precipitador electrostático*. <http://www.haijian-machine.com/9-1-electrostatic-precipitator/166556>. Consulta: Marzo de 2015.

3. FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL

En esta sección se planifican propuestas para la realización del montaje de una planta de tratamiento de cenizas, contenidas en el agua proveniente de los lavadores de gases de combustión de dos de las tres calderas de alta presión (caldera # 5 y caldera # 8) que se identifican en la figura 11, detallando todo lo relacionado a dicho montaje y su funcionamiento, tomando en cuenta que a la caldera # 6, en un futuro, se le instalará el sistema de lavado de gases. Debe considerarse que para la elaboración de este proyecto se contó con la colaboración de ingenieros, supervisores y del dibujante técnico de AutoCAD del departamento de cogeneración (ver figura 2).

3.1. Situación actual

Actualmente el agua utilizada en los lavadores de gases de combustión es conducida en canales abiertos hacia unas piletas o lagunas de sedimentación para la separación de los sólidos en el proceso de decantación. El agua limpia que se obtiene de dichas piletas es conducida nuevamente en canales abiertos hacia los lugares de cultivo de caña de azúcar para fertirriego. Con estas circunstancias no se cumple con las políticas de dependencia de agua continuamente, por tal motivo se llevará a cabo el montaje de una planta para tratar el agua obtenida de dichos lavadores, con el asesoramiento de un experto en gases de combustión de la empresa *Huntington Consultants*.

3.1.1. Sistema de lavado de gases de combustión tipo *venturi* de alta presión

Los lavadores de tipo *venturi* de las calderas # 5 y # 8 utilizan el efecto *venturi* para aumentar la velocidad de los gases de combustión, consiguiendo una buena dispersión (atomización) del agua en las corrientes de gases de combustión, aumentando de esta manera las posibilidades de impacto de las partículas (cenizas) en suspensión con las gotas, lo que permite que la ceniza en suspensión gane peso al humedecerse, precipitándose junto con el agua en el fondo del lavador, pasando por un separador de gotas para la segregación de los gases limpios y las gotitas que han capturado las partículas, que luego por gravedad son llevadas a un tanque receptor. Seguidamente, el agua con cenizas es llevada en canales abiertos decantándose en piletas donde se le decantan los sólidos, y el agua que se recupera se utiliza para fertirriego.

Figura 18. Sistema de lavado de gases de combustión, caldera # 5



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Sistema de lavado de gases*. Consulta: abril de 2015.

Después del paso de los gases por los lavadores se observa salir de la chimenea gases de color blanco, similares al vapor de agua, lo que es clara muestra de la efectividad del sistema. En estos sistemas es necesario el suministro continuo de agua debido al lavado constante que se necesita para captar con efectividad las cenizas. Por tal motivo es de suma importancia la recuperación del agua para utilizarla nuevamente en los lavadores.

Para la recuperación del agua y contribuir en la conservación del medio ambiente se hace la propuesta de realizar el montaje de una planta de tratamiento de agua que ha sido utilizada en los lavadores de gases de combustión, buscando hacer de este un proceso continuo, reutilizando el agua proveniente de los lavadores de gases y así evitando consumir grandes caudales que son tomados de los mantos acuíferos, mismos que pueden ser utilizados para otras fuentes de trabajo.

3.1.2. Piletas para la decantación de cenizas contenidas en el agua proveniente de los lavadores de gases de combustión de calderas

Actualmente el agua con cenizas que sale de los lavadores de gases de combustión de las calderas es llevada a dos grandes piletas o lagunas de sedimentación (de planta rectangular), de igual capacidad para la separación de los sólidos en el proceso de decantación. En la figura de la siguiente página se muestra una de las piletas.

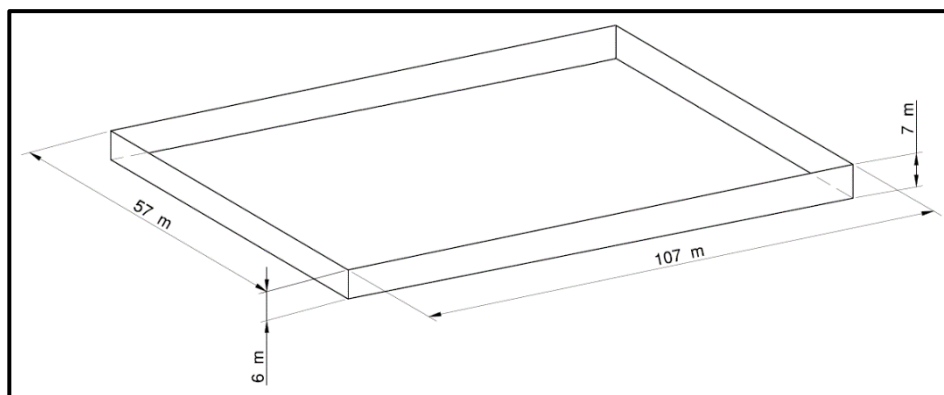
Figura 19. **Pileta de decantación de Ingenio Madre Tierra**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Pileta de decantación*. Consulta: abril de 2015.

Cada pileta tiene una capacidad máxima de $39\,643,5\text{ m}^3$, las dimensiones se muestran en la figura 20. Los criterios principales para la dimensión de las piletas son: tiempo de retención del caudal, producción de lodos y períodos de limpieza.

Figura 20. **Dimensiones de las piletas de sedimentación**



Fuente: elaboración propia.

El caudal de agua con cenizas proveniente de los lavadores de gases en canales abiertos ingresa a las piletas de sedimentación en uno de los lados y sale en sus lados opuestos, reteniéndose en ellas un largo tiempo debido a sus grandes capacidades, haciendo que las cenizas decanten, depositándose en el fondo, obteniéndose agua útil que sale por rebalse, donde es transportada nuevamente en canales abiertos para utilizarla en fertirriego en la siembra de caña de azúcar, con el objetivo de propiciar el crecimiento de la planta para que produzca la mayor cantidad de sacarosa posible.

3.2. Costo para el montaje del proyecto

Para el montaje de la planta de tratamiento de agua con cenizas intervienen costos de materiales, equipos, mano de obra y otros. El costo del montaje de la planta se debe determinar para solicitar su aprobación al departamento de cogeneración, para ello se realizó un listado de los materiales y equipos que se tendrán que instalar, y el costo de la mano de obra (puede verse la tabla V en la página siguiente). Se debe tener en cuenta que estos costos varían en función del tiempo.

Tabla V. **Costo aproximado para el montaje de la planta de tratamiento de cenizas**

| Cantidad | Material, equipo y mano de obra | Costo unitario | Costo total |
|----------|---|----------------|-------------|
| 2 | Construcciones de tanques para agua sucia y para agua clarificada | Q25,000.00 | Q50,000.00 |
| 2 | Bombas con motores eléctricos para agua sucia | Q50,000.00 | Q100,000.00 |
| 7 | Válvulas de control manual de agua con cenizas | Q15,000.00 | Q105,000.00 |
| 2 | Bombas con motores eléctricos para agua clarificada | Q60,000.00 | Q120,000.00 |
| 7 | Válvulas de control manual de agua clarificada | Q15,000.00 | Q105,000.00 |
| 6 | Válvulas de control manual de agua de llenado de tanques de preparación y reposición | Q10,000.00 | Q60,000.00 |
| 3 | Construcciones de tanques para floculante | Q10,000.00 | Q30,000.00 |
| 1 | Construcción de agitador de floculante | Q10,000.00 | Q10,000.00 |
| 1 | Moto-reductor de agitador de floculante | Q15,000.00 | Q15,000.00 |
| 2 | Bombas con motores eléctricos para floculante | Q25,000.00 | Q50,000.00 |
| 8 | Válvulas de control manual de floculante | Q10,000.00 | Q80,000.00 |
| 2 | Construcciones de tanques para lechada de cal | Q15,000.00 | Q30,000.00 |
| 2 | Construcciones de agitadores de lechada de cal | Q7,500.00 | Q15,000.00 |
| 2 | Moto-reductores de agitador de lechada de cal | Q15,000.00 | Q30,000.00 |
| 2 | Válvulas de control manual de lechada de cal | Q12,000.00 | Q24,000.00 |
| 1 | Filtro rotativo para lodos | Q250,000.00 | Q250,000.00 |
| 1 | Motor y reductor para filtro rotativo | Q15,000.00 | Q15,000.00 |
| 1 | Prensa para la deshidratación de lodos | Q800,000.00 | Q800,000.00 |
| 1 | Motor de prensa desaguadora | Q20,000.00 | Q20,000.00 |
| 4 | Tolvas decantadoras de lodos | Q50,000.00 | Q200,000.00 |
| 4 | Construcciones de válvulas rotativas para la extracción de lodos de las tolvas | Q10,000.00 | Q40,000.00 |
| 4 | Motores y reductores de las válvulas rotativas para la extracción de lodos de las tolvas | Q10,000.00 | Q40,000.00 |
| 4 | Flipones para motores de agua sucia y agua clarificada | Q5,500.00 | Q22,000.00 |
| 6 | Flipones para motores de floculante y válvulas rotativas | Q900.00 | Q5,400.00 |
| 1 | Flipón para prensa deshidratadora de lodos | Q1,500.00 | Q1,500.00 |
| 4 | Flipones para motores de filtro rotativo, agitador de cal y agitador de floculante | Q900.00 | Q3,600.00 |
| 2 | Variadores de frecuencia para motores de agua sucia | Q142,500.00 | Q285,000.00 |
| 2 | Arrancadores suaves para motores de agua clarificada | Q62,900.00 | Q125,800.00 |
| 6 | Variadores de frecuencia para motores de floculante y válvulas rotativas | Q3,000.00 | Q18,000.00 |
| 4 | Arrancadores para filtro rotativo, agitador de cal y agitador de floculante | Q1,500.00 | Q6,000.00 |
| 1 | Arrancador para prensa deshidratadora de lodos | Q3,750.00 | Q3,750.00 |
| 1 | Tablero de potencia I-Line para flipones | Q15,000.00 | Q15,000.00 |
| 1 | Tablero para luminarios | Q800.00 | Q800.00 |
| 1 | Gabinete para arrancadores | Q16,000.00 | Q16,000.00 |
| 1 | Transformador de servicio | Q10,000.00 | Q10,000.00 |
| 1 | Cuarto para control de equipos eléctricos | Q17,000.00 | Q17,000.00 |
| 2 | Válvulas automáticas para control de nivel y para dosificación de cal | Q30,000.00 | Q60,000.00 |
| - | Cables para acometida eléctrica | - | Q180,000.00 |
| - | Tubería para acometida eléctrica | - | Q28,000.00 |
| - | Lámparas cobra y lámparas 2X54 | - | Q12,000.00 |
| - | Equipos para automatización (válvulas automáticas, medidores de flujo, transmisores de nivel, caja remota que contenga las señales, etc.) | - | Q325,000.00 |
| - | Aire Acondicionado | - | Q6,000.00 |
| - | Tubería para acometida de aire comprimido | - | Q25,000.00 |
| - | Tubería de proceso de acero al carbono, cedula 40 | - | Q75,000.00 |
| - | Lámina de acero inoxidable para tubería de agua con cenizas | - | Q50,000.00 |
| - | Codos | - | Q25,000.00 |
| - | Perfiles estructurales H | - | Q120,000.00 |
| - | Perfiles estructurales C | - | Q50,000.00 |
| - | Perfiles estructurales L o angulares | - | Q25,000.00 |
| - | Perfiles redondo | - | Q30,000.00 |
| - | Lámina expandida | - | Q50,000.00 |
| - | Cemento, arena y pedrín | - | Q100,000.00 |
| - | Varillas corrugadas y varillas lisas | - | Q15,000.00 |
| - | Mano de obra | - | Q250,000.00 |
| - | Diseñador | - | Q100,000.00 |

Total costo Q4,244,850.00

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por Ingenio Madre Tierra.

Consulta: mayo de 2015.

El presupuesto para realizar el montaje de la planta de tratamiento fue aprobado por el departamento de cogeneración, por tal motivo se inició con el proceso.

3.3. Montaje de la planta de tratamiento de agua con cenizas

El montaje es la combinación de las diferentes piezas de una instalación que conforma la planta de tratamiento. De los elementos que conforman dicho sistema, algunos fueron comprados de fábrica, otros fueron comprados de segunda mano y la mayoría fueron construidos e instalados por el departamento de montaje de cogeneración (soldadores, mecánicos, electricistas, entre otros), quienes se guiaron con los planos realizados por el diseñador. La mayoría de los equipos se adquirieron de segunda mano, para reducir costos.

3.3.1. Ubicación geográfica específica de la planta de tratamiento de agua con cenizas

La planta de tratamiento de cenizas se construyó muy próxima a la planta de tratamiento de agua cruda utilizada para la generación de vapor en las calderas. Es un lugar apropiado para el montaje, ya que está cerca de las calderas # 5 y # 8, esto con el fin de reducir costos de tubería, utilizada para conducir el agua que proviene de los lavadores de gases hacia la planta para su tratamiento y viceversa. Es útil ver la imagen de la siguiente página.

Figura 21. **Ubicación geográfica específica de la planta de tratamiento de agua con cenizas**



Fuente: elaboración propia.

Y en la siguiente página se muestra otra figura en la que se muestra una fotografía del área donde se realizó el montaje de la planta.

Figura 22. **Área donde se realizó la cimentación de la planta**

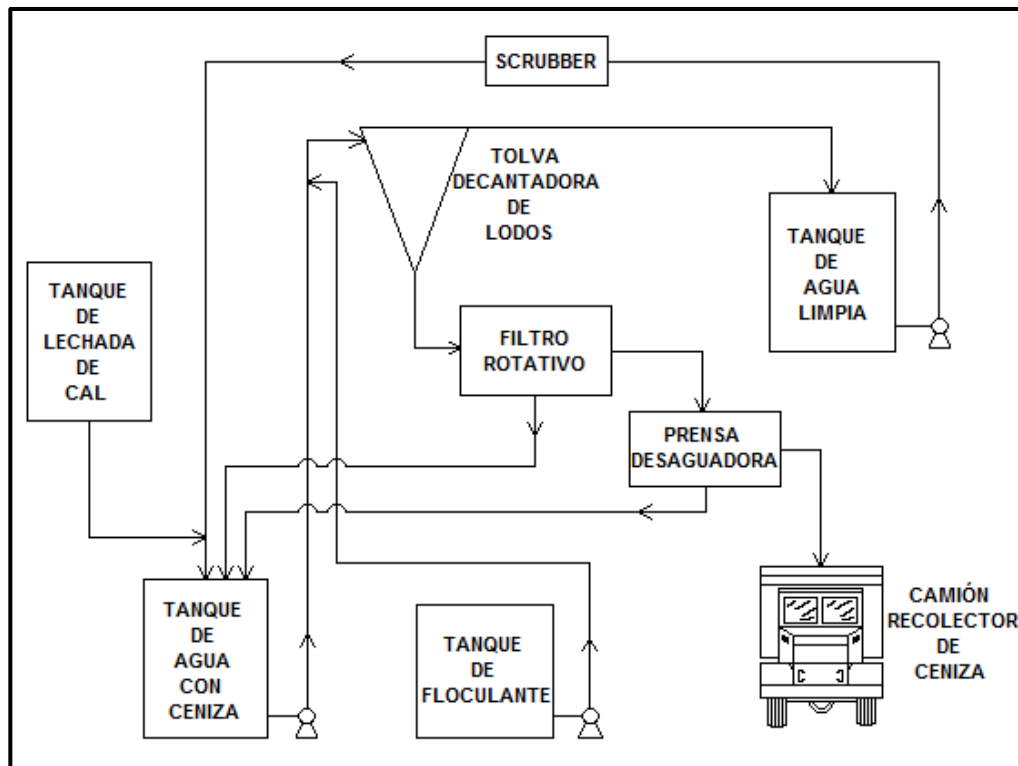


Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Área para planta de tratamiento*. Consulta: noviembre de 2014.

3.4. Análisis del montaje de la planta de tratamiento de agua con cenizas

El sistema está compuesto por varios elementos y tiene como objetivo primordial reutilizar el agua proveniente de los lavadores de gases de combustión de las calderas # 5 y # 8. Con esto se evitará tomar agua de los afluentes naturales. Se contó con materiales recuperados utilizados en otros tipos de montajes, que se aprovecharon para la construcción y montaje de la planta, con el objetivo de reducir costos. En la figura 23, en la siguiente página, se muestra un diagrama simplificado del proyecto.

Figura 23. **Diagrama simplificado del sistema de tratamiento de agua con cenizas**



Fuente: elaboración propia.

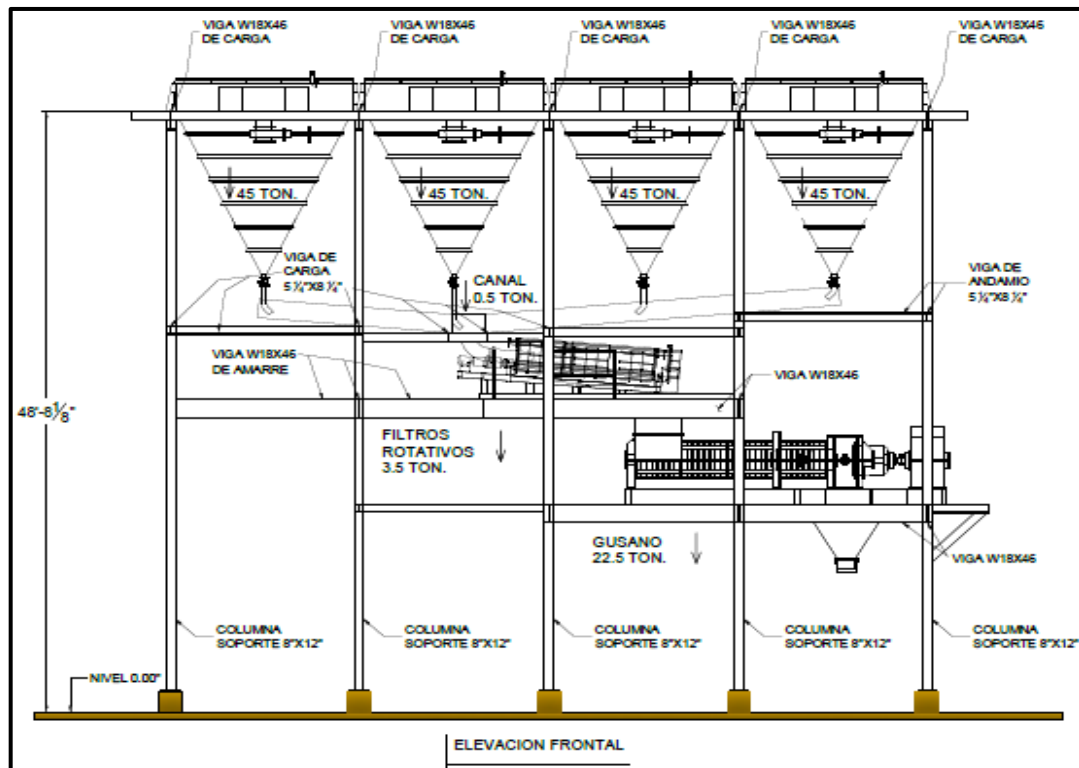
3.4.1. **Análisis de cargas aplicadas en la estructura**

La característica más importante de un elemento estructural es su resistencia real, la cual debe ser lo suficientemente elevada para resistir con una cierta holgura todas las cargas previsibles que puedan actuar sobre ella, sin que se presente falla o cualquier otro inconveniente. Existen dos tipos de cargas principales en una estructura, de acuerdo con la dirección en que estas son aplicadas; pueden ser cargas verticales y cargas horizontales.

3.4.1.1. Cargas verticales

Las cargas verticales se pueden clasificar de distintas formas, dependiendo del uso de la estructura, por ejemplo, pueden ser cargas muertas y cargas vivas. Las cargas muertas son cargas permanentes en la estructura, como lo es el propio peso de esta. Por lo general son relativamente constantes durante toda la vida de la estructura. En la figura 24 se muestra el diseño de la planta de tratamiento de agua con cenizas con las cargas sobresalientes ejercidas por los elementos permanentes en la estructura (cargas muertas).

Figura 24. **Cargas muertas sobresalientes en la estructura de la planta de tratamiento de agua con cenizas**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Cargas muertas de la planta*. Consulta: diciembre de 2015.

Las cargas vivas son generadas por el uso de la estructura y por cualquier elemento móvil en la misma.

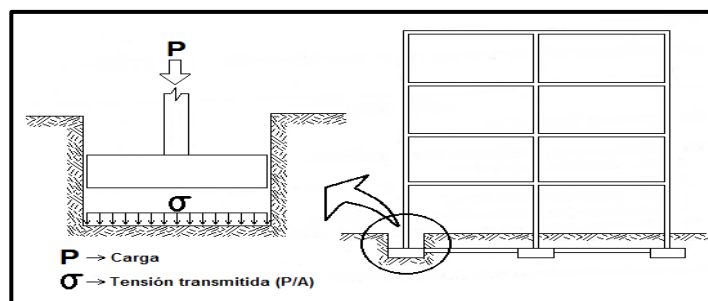
3.4.1.2. Cargas horizontales

Las cargas horizontales actúan perpendicularmente a la línea de acción de la gravedad, son producidas comúnmente por sismos y vientos y puramente dinámicas, mientras que las cargas verticales son estáticas. Estas cargas son de suma importancia y deben considerarse al momento de realizar cualquier tipo de análisis estructural. Guatemala está ubicada en una región altamente sísmica, es por ello que las estructuras están propensas a sufrir cargas horizontales.

3.4.2. Cimentación para el montaje de la planta

La estructura de la planta proporciona esfuerzos de compresión o tracción hasta las bases y se deben distribuir en forma pareja al terreno para que no originen tensiones mayores de las que puede soportar. El cimiento es la parte de la estructura encargada de transmitir y distribuir las cargas actuantes de la planta al terreno. Es importante observar la figura de la siguiente página.

Figura 25. Tensión transmitida al terreno



Fuente: elaboración propia.

La elección del tipo de cimentación depende especialmente de las características mecánicas del terreno, como la composición y resistencia de este para poder soportar las cargas propias de la planta. También se tienen que tomar en cuenta otros factores que pueden incidir, como el efecto del viento y los movimientos sísmicos. A partir de todos esos datos se calcula la capacidad portante del terreno, y así puede definirse el tipo de cimentación a realizar.

La capacidad portante de un terreno es la carga máxima que dicho terreno es capaz de soportar, o sea, es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno, tal que no se produzca un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo. De acuerdo a los ensayos del suelo realizados por un ingeniero civil, se llegó a la conclusión que la cimentación adecuada para la planta es la de tipo zapatas aisladas, y se determinó que su carga máxima o capacidad del terreno a 2 metros de profundidad es de 1 tonelada por 1 pie cuadrado. Esto indica que cada tonelada de peso de la estructura se debe distribuir en un área de un pie cuadrado. De acuerdo a los datos obtenidos se calculó la cantidad y el tamaño de las zapatas que se deben construir para el montaje de la planta. Los resultados se presentan a continuación, calculando el peso total de la planta con base en la figura 24:

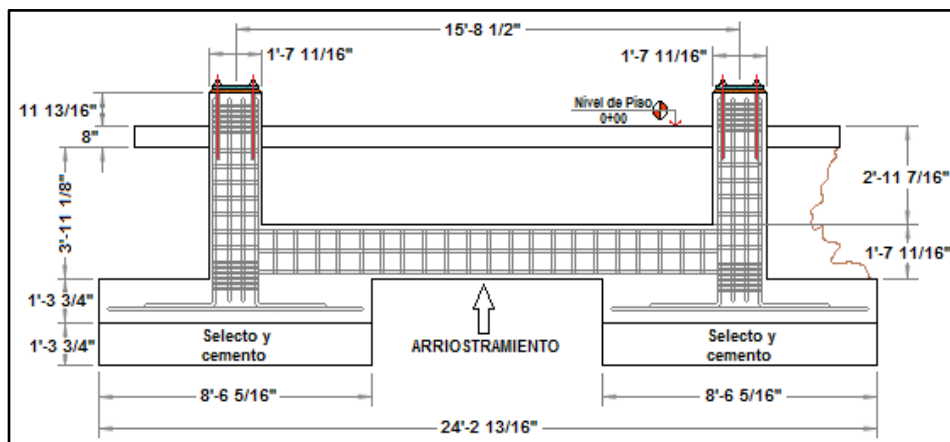
Tabla VI. **Peso estructural aproximado**

| CANTIDAD | ELEMENTOS ESTRUCTURALES | PESO UNIDAD (TONELADA) | PESO TOTAL (TONELADA) |
|------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| 4 | Tolvas | 45 | 180 |
| 1 | Filtro rotativo | 3,5 | 3,5 |
| 1 | Prensa de deshidratación | 22,5 | 22,5 |
| - | Perfiles | 118 | 118 |
| - | Otros | 3 | 3 |
| Peso total | | | 327 |

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla VI, el peso total aproximado de toda la estructura es de 327 toneladas. Si se necesita 1 pie cuadrado por cada tonelada de la estructura, entonces se sabe que con las 327 toneladas de la estructura se necesitan 327 pies cuadrados de área en las zapatas. Calculando para 10 zapatas, resulta que cada zapata debe tener un área de 32,7 pies cuadrados. Con las zapatas de planta cuadrada se tiene que para un área de 32,7 pies cuadrados, los lados deben tener 5,72 pies (1,75 m). Por seguridad, los lados de las zapatas se sobredimensionarán a 8' 6 5/16" (2,6 m), como se muestra en la figura 26, para obtener en cada zapata un área de 72,7 pies cuadrados; en las diez zapatas resulta un área de 727 pies cuadrados (400 pies cuadrados de sobredimensión). Por lo cual se tiene un factor de seguridad de 400 toneladas para montar la estructura de acuerdo al diseño. Las zapatas se construirán de concreto armado y de planta cuadrada, y se arriostrarán para mayor rigidez de la estructura por fuerzas extras que generan el viento o el sismo.

Figura 26. **Vista de planta de diseño estructural de zapatas**



Fuente: Ingenio Madre tierra. *Planta de diseño*, utilizando AutoCAD.

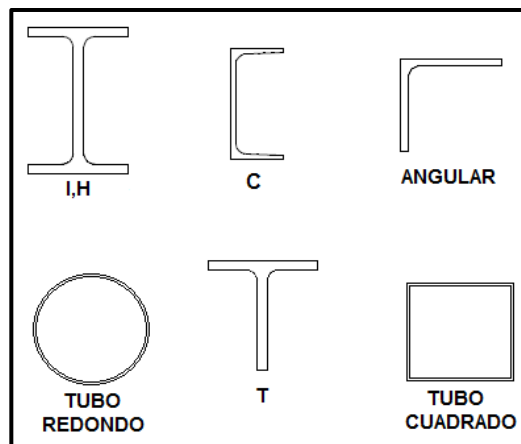
Los cimientos, por lo general, se construyen de hormigón armado (concreto armado), salvo obras de tamaño pequeño en las que se puede emplear hormigón en masa (sin armadura). La principal característica estructural del hormigón en masa es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante y otros), por este motivo es habitual usarlo asociado a ciertas armaduras de acero, denominándose hormigón armado o concreto armado. Otra de las funciones del hormigón en masa es proteger las armaduras de la corrosión. Las zapatas aisladas son un tipo de cimentación que sirve de base a elementos estructurales puntuales como son los pilares o columnas. Amplían la superficie de apoyo hasta lograr que el suelo soporte sin problemas la carga que le transmite. Por su parte, el arriostramiento es la unión de varias zapatas por medio de vigas riostras o de atado, es decir, se trata de elementos estructurales de hormigón armado que atan horizontalmente las zapatas aisladas entre sí, con la finalidad de absorber las posibles acciones horizontales que puedan recibir las zapatas, ya sea de la estructura o bien del propio terreno, evitando de esta forma el desplazamiento lateral de uno respecto a otro, ya que todas funcionan en conjunto para tener un mejor equilibrio en la construcción de la planta. Son especialmente útiles en zonas sísmicas.

3.4.3. Montaje de estructuras metálicas

La estructura es un conjunto de elementos unidos entre sí, capaces de soportar, además de su propio peso, las fuerzas que actúan sobre ellos. El montaje es un trabajo que requiere mucha organización y orden. Las estructuras sufren esfuerzos de tracción, compresión, flexión, torsión y cortadura.

Existen diferentes perfiles estructurales (barras metálicas) que varían según la forma en su sección transversal y, entre los más utilizados en una estructura metálica, pueden citarse: perfil tipo I o H, C, etc., como se muestra en la figura 27.

Figura 27. **Sección típica de perfiles de acero más utilizados en la construcción con estructura metálica**



Fuente: elaboración propia.

3.4.3.1. Columnas

Son los elementos verticales que trabajan a compresión en la estructura de la planta. Son las responsables de soportar y transmitir las cargas a los cimientos donde van ajustadas con cuatro pernos anclados, de 1 pulgada de diámetro. Para las columnas se utilizaron perfiles estructurales de sección I, estos son utilizados principalmente para soportar esfuerzos como tracción, compresión y flexión.

Figura 28. **Perfil de sección I, H**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Perfil de sección I, H.*

3.4.3.2. Vigas

Una viga es un elemento estructural lineal diseñado para soportar cargas aplicadas en diferentes puntos de su longitud. En la mayoría de los casos, estas cargas son perpendiculares al eje principal de la viga produciéndose esfuerzos cortantes y de flexión. Si en algún caso se aplican cargas paralelas a la viga se producirán esfuerzos axiales. El esfuerzo de flexión provoca tensiones de tracción y compresión, produciéndose las máximas en el cordón inferior y en el cordón superior respectivamente. Para las vigas se utilizaron perfiles estructurales de sección igual a las que se utilizaron para las columnas (sección I o H, ver figura 28).

En algunas partes, como por ejemplo para los pasillos en donde no se producen grandes esfuerzos, se utilizaron perfiles de sección U y angulares. La estructura de la planta es diseñada de cuatro niveles para su correcta operación, facilidad en la instalación de los equipos y accesorios y, además, para la fácil movilización de los operarios.

Figura 29. **Estructura de la planta montada**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Planta montada.*

Para estructuras altas, las fuerzas laterales deben considerarse, como por ejemplo la fuerza del viento y los sismos, al igual que las fuerzas verticales. Las fuertes presiones del viento sobre los lados de un edificio alto producen momentos de volteo. Estos momentos los resisten axialmente sin dificultad las columnas, pero los cortantes horizontales producidos en cada nivel pueden ser de gran magnitud y es necesario usar arriostramiento. En este caso se arriestró excéntricamente utilizando perfiles estructurales huecos y redondos (tubos redondos).

Figura 30. **Tubos redondos para arriostamiento de la estructura**



Fuente: ingenio Madre Tierra. *Arriostamiento.*

Para la instalación de los diferentes perfiles estructurales, riostras, vigas y columnas, se soldaron con arco eléctrico utilizando electrodos E6011 y E7018.

Figura 31. **Instalación de vigas de sección circular para refuerzo de la estructura**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de vigas.*

Durante la instalación de los elementos se estuvo colocando bases para pasillos y malla de metal expandido de acero al carbono en cada uno de los niveles para la movilización de los operarios.

Figura 32. **Corte adecuado para la colocación de malla expandida en pasillo**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Colocación de malla.*

3.4.4. Construcción e instalación de tanques de almacenamiento y tolvas decantadoras

La eficiencia de operación de la planta depende principalmente del porcentaje de clarificación del agua que se trate, esto implica tomar importancia a la cantidad de caudal que se tratará, para poder elegir el tipo y tamaño del diseño de cada elemento que formará parte del sistema. La mayoría de los elementos o accesorios, como tanques y algunas tuberías, se construyeron a base de láminas de acero al carbono o acero inoxidable de diferentes espesores y diámetros, utilizando soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Algunos elementos reciclados en la bodega #8 fueron modificados y aprovechados para ser utilizados en el proyecto, con el fin de reducir costos.

3.4.4.1. Tanques para agua con cenizas y agua limpia

Los tanques, tanto para agua con cenizas como para agua limpia, se obtuvieron de un cilindro, parte de un *scrubber* que ha sido reciclado y se aprovechó con el fin de reducir costos.

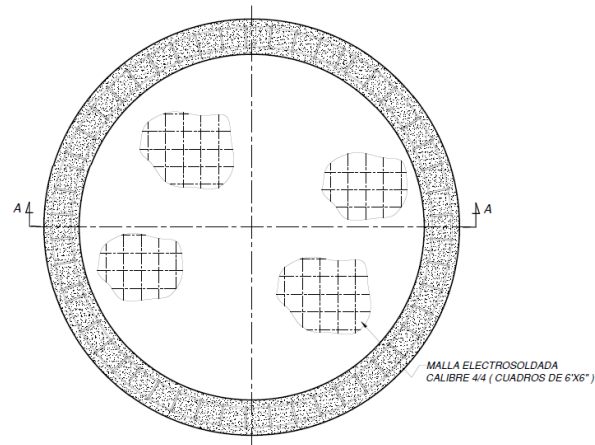
Figura 33. **Cilindro donde se obtuvieron los tanques para agua sucia y limpia**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Cilindro*.

Antes de realizar la instalación de ambos tanques se realizaron las bases de concreto armado con armadura tipo canasta reforzada con varillas corrugadas y lisas de construcción. La base del tanque de agua con cenizas tiene una profundidad de 4' 2 1/2", y la del tanque de agua clarificada es de 3' 7 1/2". En la siguiente figura se muestra en vista de planta el diseño de las bases de ambos tanques.

Figura 34. **Vista de planta de las bases de concreto armado para tanques de agua con cenizas y agua clarificada**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Bases de concreto armado.*

El tanque de agua sucia servirá para almacenar el agua que proviene de los lavadores de gases de las calderas, y posteriormente se enviará a las tolvas decantadoras para su clarificación. Este tanque está conformado por un cilindro y un tronco de cono, con una capacidad máxima de 8 000 galones.

Figura 35. **Instalación de tanque para agua con cenizas**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Tanque para agua con cenizas.*

El tanque de agua limpia servirá para almacenar el agua que ha sido clarificada en las tolvas de decantación. Está conformado por un cilindro y un cono en la parte superior, teniendo una capacidad máxima de 7 000 galones.

Figura 36. **Instalación de tanque para agua limpia**



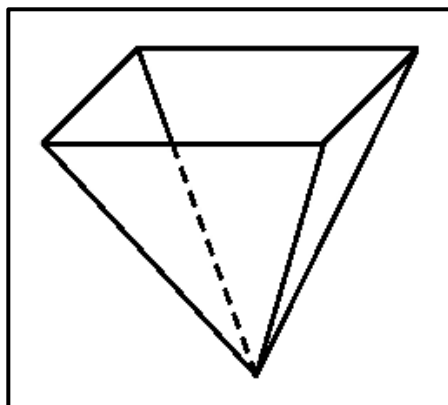
Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Tanque para agua limpia.*

El tipo de material de ambos tanques es lámina de acero inoxidable de 1/4" de espesor. Para la modificación se soldaron con electrodos de acero inoxidable E316L-16.

3.4.4.2. Tolvas decantadoras de lodos

Estas tolvas recibirán y retendrán un determinado tiempo el caudal de agua proveniente del tanque de agua con cenizas, para lograr la precipitación de estas mediante la dosificación de una sustancia química llamada floculante. Después, para consumir menos floculante y lograr una precipitación eficiente, el flujo de agua debe permanecer una cantidad de tiempo suficiente en las tolvas, diseñándose de acuerdo a la cantidad de flujo y su concentración de cenizas. Se construyeron cuatro tolvas de forma piramidal (pirámide rectangular recta), que se colocarán de forma invertida (como se muestra en la figura 37). La pendiente servirá para que el sedimento se deslice fácilmente en la parte inferior que conecta a una tubería para su transportación al filtro rotativo.

Figura 37. **Cuerpo geométrico de las tolvas para la decantación de lodos**



Fuente: elaboración propia.

La ecuación teórica para calcular el tiempo de retención de un líquido en un recipiente es:⁴

$$T = \frac{V}{Q}$$

Donde

T = Tiempo teórico de retención (minutos)

V = Volumen del recipiente (galones)

Q = Caudal de entrada (galones por minuto)

Este es el tiempo que tardaría una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir del recipiente en caso que todas las partículas del fluido evolucionaran en la misma forma dentro de ese recipiente. Cabe indicar que el caso corresponde a un flujo estable ideal.

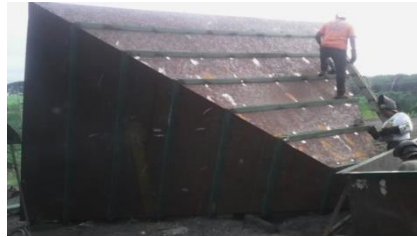
En la práctica es difícil que esto ocurra, ya que las condiciones hidráulicas del flujo (regiones o zonas muertas, corrientes de inercia y otros) hacen imposible las condiciones de flujo estable.

En el caso de la planta de tratamiento, el tiempo de retención teórico del agua con cenizas en las tolvas es de veintidós minutos, tratando un caudal de 2 000 gpm.

Las tolvas se construyeron a base de láminas de acero ASTM A36 de 3/8” de espesor, reforzadas con angulares soldados en el exterior, como se muestra en la siguiente figura:

⁴ HERNÁNDEZ RAMÍREZ, Erick Fernando. *Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”*. p. 35.

Figura 38. **Construcción de tolva para la decantación de lodos**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Tolva para decantación.*

A cada tolva también se le soldó un prisma rectangular abierto en la parte superior, construido del mismo tipo de material y espesor que las tolvas. La pieza prismática rectangular se muestra en la siguiente figura:

Figura 39. **Construcción de una de las piezas prismáticas rectangulares**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Construcción de pieza prismática.*

Unas de las piezas fundamentales de las tolvas son los cargadores, estas piezas servirán para poder asentar las tolvas en la estructura de la planta. Se construyeron a base de lámina de acero al carbono ASTM A36 de 5/8" de espesor, soldados con electrodos E6011 y E7018. También se le hicieron cortes con oxiacetileno. Los cargadores se colocaron en la parte exterior de los prismas rectangulares soldados en la parte superior de las tolvas. Puede verse la figura de la siguiente página.

Figura 40. **Construcción de un cargador de tolva decantadora de lodos**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Cargador de tolva.*

Para la colocación de las piezas prismáticas en las tolvas fue necesario el uso de grúa. En la figura 41a se muestra una grúa marca Grove de 18 toneladas de capacidad, levantando una de las piezas para soldarla a una de las tolvas como se muestra en la figura 41b.

Figura 41. **Ensamble de pieza de forma prismática rectangular en la parte superior de las tolvas de decantación**



(a)

Continuación de la figura 1.



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Ensamble de pieza prismática.*

Después de realizar los puntos de soldadura en unas partes de las piezas prismáticas a cada una de las tolvas, los soldadores se dedicaron a unir las completamente con soldadura, utilizando electrodos E6011 y E7018.

Figura 42. **Finalizando la construcción de las tolvas decantadoras de lodos**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Fin de construcción de tolvas.*

Para la instalación de las tolvas decantadoras de lodos en la estructura se utilizó una grúa móvil marca P&H, modelo Century II, con una capacidad de 65 toneladas.

Figura 43. **Instalación de tolvas decantadoras de lodos en estructura**



(a)



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de tolvas.*

3.4.4.3. Tanques para preparación de lechada de cal

La construcción de estos tanques servirá para la preparación de lechada de cal (cal hidratada y agua) que servirá para neutralizar el agua con cenizas.

Para los tanques se utilizó material de una chimenea reciclada. Se construyeron dos tanques en total, de forma cilíndrica, con capacidad de 1 800 galones cada uno. El material de los tanques es acero ASTM A36 de 3/8" de espesor, soldados con electrodos E6011 y E7018.

Figura 44. **Construcción de tanque para preparación de lechada de cal.**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Construcción de tanque.*

Para la instalación de los tanques en la estructura se utilizó la grúa móvil hidráulica marca Grove. También fue necesaria la utilización de eslinga para sostener el tanque (ver figura 45).

Figura 45. **Instalación de tanques para preparación de lechada de cal**



(a)



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de tanques para lechada.*

A cada tanque se le instaló un agitador mecánico con el fin de disolver constantemente la solución de lechada de cal (agua y cal hidratada), para que la cal no se concentre en el fondo de los tanques.

Figura 46. **Eje utilizado para el agitador mecánico**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Eje para agitador mecánico.*

Para el mecanismo de giro de los agitadores se utilizaron engranajes (corona y piñón) de diferenciales Eaton de camiones de 42 000 libras adquiridos del taller automotriz del ingenio. El ratio de dichos diferenciales es de 5,375 (43 dientes de la corona y 8 dientes del piñón de ataque). La instalación se muestra en la siguiente figura:

Figura 47. **Mecanismo del agitador de lechada de cal**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Mecanismo del agitador de lechada.*

3.4.4.4. Tanques para floculante

El floculante es el encargado de provocar la precipitación de los lodos (cenizas, arena, entre otros) en las tolvas. Se construyeron tres tanques de 2 000 litros. Uno de ellos se utilizará para la preparación de la solución (floculante y agua) y los otros dos para la dosificación del floculante líquido. Mediante bombas se inyectará la solución al caudal de agua con cenizas antes de ingresar a las tolvas para su precipitación. La solución (floculante y agua) bombeada se conducirá en una tubería de 2 pulgadas de diámetro. Los tanques fueron construidos utilizando unas bases de unos condensadores barométricos reciclados.

Figura 48. Bases de dos de los tres tanques para floculante



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Bases de los tanques.*

Los tres tanques son de forma cilíndrica, solo se les agregó la otra parte para formar el tamaño del cilindro que se requiere. El material de los tanques es acero ASTM A36 de 3/8" de espesor. Para la modificación y construcción se soldó con electrodos E6011 y E7018.

Figura 49. **Construcción de tanques para floculante**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Construcción de tanques para floculante.*

Los tanques de dosificación van instalados sobre unas bases de concreto armado y el tanque de preparación se instaló en la estructura de la planta de tratamiento. La armadura de las bases de los tanques de dosificación se realizó con varillas de 1/2", 3/8" y 5/8", y sobre ellas se amarraron vigas H, unidas con tubería, como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 50. **Construcción de bases para tanques de floculante**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Construcción de bases para tanques.*

A la armadura mostrada se le agregó concreto para ayudar a obtener una mayor rigidez y un mejor soporte. La instalación del tanque para la preparación de la solución (floculante y agua) se muestra en la siguiente figura.

Figura 51. **Instalación de tanque para preparación de floculante**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de tanque para floculante.*

Al tanque de preparación se le instaló un agitador mecánico (con mecanismo idéntico a los agitadores de lechada de cal) para disolver constantemente la solución (agua y floculante), con el fin de obtener una solución completamente homogénea y así contar con una mayor eficacia en la precipitación de las cenizas. Para el mecanismo del giro del agitador se utilizó un engranaje planetario y un engranaje satélite de un diferencial Eaton de camión de 42 000 libras, utilizando un engranaje planetario de 16 dientes y un engranaje satélite de 9 dientes, teniendo una reducción de velocidad con ratio de 1,78. La instalación de los otros dos tanques de dosificación de floculante se muestra en la siguiente figura:

Figura 52. **Instalación de tanques de dosificación de floculante**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de tanques de dosificación.*

Para la instalación de los tres tanques se utilizó la grúa hidráulica marca Grove.

3.4.5. Instalación de equipos

Antes de iniciar la instalación de los equipos se revisó a detalle cada uno de ellos, con los elementos del paquete, para poder adquirir o construir todos aquellos elementos complementarios que fueron necesarios. Para el montaje de cada equipo se utilizó la grúa móvil hidráulica marca Grove con capacidad de 20 toneladas, y en algunas instalaciones se utilizó polipasto de diferentes capacidades.

3.4.5.1. Filtro rotativo para lodos

Es una máquina destinada para la filtración de líquidos (separación sólido-líquido). Su característica de diseño es de alto rendimiento, capaz de operar durante largos períodos de tiempo sin necesidad de atención. En este caso separará las cenizas provenientes de las tolvas decantadoras, reduciendo la

humedad contenida en los lodos antes de ser llevados a la prensa de exprimido. El equipo está formado principalmente por tres ejes (véase figura 53a) y dos filtros (véase figura 53b), todos en paralelo.

Figura 53. **Partes principales del filtro rotativo**



(a)



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Filtro rotativo.*

El eje central es el motriz, ya que va acoplado al moto-reductor, y por medio de fricción hará girar los filtros. Los otros dos ejes girarán libremente sirviendo de apoyo a los filtros. El equipo completo fue comprado de segunda mano. La máquina está construida totalmente de acero inoxidable, funciona con

bajo consumo de energía e índices de mantenimiento bajos, reduciendo el riesgo de paradas no programadas, y aumentando así la confiabilidad del proceso. El líquido filtrado caerá y se conducirá por gravedad en tubería hacia el tanque de agua sucia (agua con cenizas). Los filtros tienen un diámetro de 25 pulgadas y 3 metros de longitud. Las ventajas principales del filtro rotativo son:

- Alto grado de eficiencia
- Bajo costo de mantenimiento
- Bajo consumo de energía
- Operación simplificada

Los accesorios principales de la máquina son:

- Colector de lodos construido totalmente con lámina de acero inoxidable.
- Tubos con series de boquillas atomizadoras construidos de acero inoxidable.
- Telas de acero inoxidable de ranuras continuas para la filtración.
- Estructura de soporte construido con vigas I de acero al carbono.

La unidad consta de un conjunto de motor-reductor, de diseño compacto con un motor eléctrico de 5 hp, 1 745 rpm, 460 V, 6,5 A, 60 Hz. El reductor tiene un ratio de 20,52 y la transmisión reductor/filtros es por medio de engranajes. En cuanto a la instalación de la máquina en la estructura de la planta, se utilizó la grúa móvil hidráulica marca P&H.

Figura 54. **Instalación de filtros rotativos**

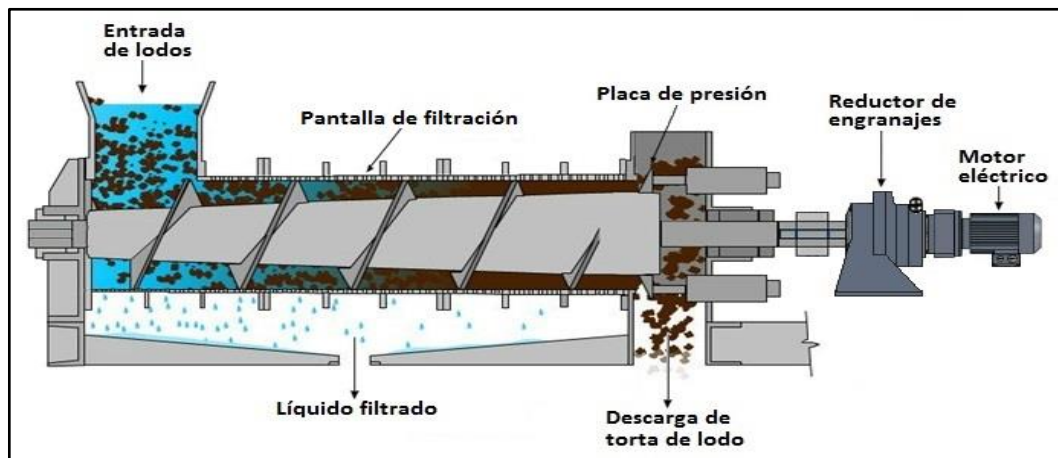


Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de filtros rotativos.*

3.4.5.2. **Prensa de tornillo para deshidratación de lodos**

Es una máquina destinada para la separación de sólido-líquido, utilizada a menudo en materiales que son difíciles de presionar. La compresión se crea gradualmente por el aumento del diámetro del tornillo a lo largo de su longitud.

Figura 55. **Sección transversal de la prensa de tornillo**



Fuente: elaboración propia, empleando Auto CAD.

El tornillo comprime el material contra una pantalla o filtro y el líquido cae en un receptor, transportándose por gravedad al tanque de agua con cenizas. A continuación se presenta el equipo adquirido antes de ser instalado en la estructura. En la figura 56b se puede observar parte del tornillo.

Figura 56. **Prensa de tornillo para deshidratación de lodos**



(a)



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Prensa de tornillo.*

Los sólidos se introducirán en la total de carga, donde una plancha con una laminilla con orificios especiales permitirá la compactación y deshidratación del material transportado. El líquido filtrado caerá y se conducirá por gravedad

en tubería hacia el tanque de agua sucia (agua con cenizas). Para la instalación de la prensa desaguadora de tornillo en la estructura de la planta, de la misma manera que en los filtros rotativos, se utilizó la grúa móvil hidráulica marca P&H, modelo century II, con una capacidad de 65 toneladas.

Figura 57. **Instalación de prensa desaguadora de tornillo**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de prensa.*

En cuanto a los accesorios externos del equipo, la unidad consta de un conjunto de motor-reductor, de diseño compacto con un motor eléctrico de 40 hp, 1185 rpm, 460 V, 47,6 A y 60 Hz. El reductor tiene un ratio de 59.

3.4.5.3. Bombas de agua con cenizas (agua sucia)

Estas máquinas bombearán el agua sucia almacenada en el tanque destinado para dicho fluido. En este caso se utilizarán dos bombas centrífugas horizontales de una etapa, impulsor cerrado, simple succión, forradas de goma, marca Goulds, modelo SRL-C y tamaño 10X8X21 (el 10 indica el diámetro de succión, el 8 indica el diámetro de descarga y el 21 indica el diámetro del impulsor, medidos en pulgadas). Las bombas Goulds, modelos SRL-C, utilizan

sistemas hidráulicos probados para ofrecer alta eficiencia en el bombeo de lodos abrasivos y/o corrosivos. El impulsor cerrado está diseñado para manejo de lodos muy abrasivos con altas concentraciones de sólidos de hasta 1/4 de pulgada (6,4 mm). Las bombas tienen una capacidad máxima de 3 000 gpm, con motores idénticos de 200 hp, corriente nominal de 227 A y una velocidad de 1 190 rpm. Antes de iniciar con los montajes de las bombas, se construyeron sus bases para sus anclajes, iniciando con realización de zanja.

Figura 58. **Zanja para la construcción de bases de las bombas de agua sucia**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Zanja para bases.*

Para las dos bombas y motores eléctricos se construyó una sola base de concreto armado. En las bases se utilizaron vigas, ya que sobre ellas se soldaron dos bancadas de acero ASTM A36; en cada bancada se ancló con pernos de 1/2" de diámetro una bomba con su respectivo motor eléctrico. Para la posición adecuada de cada bomba se utilizó polipasto (ver figura 59). Antes de instalar las bancadas se les realizó las roscas internas para los pernos de anclaje.

Figura 59. **Instalación de bombas de agua sucia**



(a)



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de bombas de agua sucia.*

Las dos bombas fueron utilizadas en la caldera # 5 para el bombeo de agua hacia el *scrubber* (lavador de gases).

3.4.5.4. Bombas para agua limpia

Son máquinas que se utilizarán para el bombeo del agua tratada (agua limpia) almacenada en el tanque destinado para dicho fluido. En este caso se utilizarán dos bombas centrífugas horizontales de una etapa, impulsor cerrado,

aspiración doble, marca Goulds, modelo 3410 y tamaño 8x10-17. El formato o fórmula para el tamaño de la bomba es: diámetro de descarga x diámetro de succión - diámetro máximo nominal del impulsor, en pulgadas. La línea del modelo Goulds 3410 está diseñada para trabajar en una amplia gama de servicios industriales, municipales y marítimos, que incluyen:

- Proceso: intercambiadores de calor y torre de enfriamiento.
- Pulpa y papel: limpiador primario y secundario, suministro de agua de molino filtrada.
- Municipal: elevación alta, elevación baja, agua de lavado, agua de desecho y agua bruta o cruda.
- Servicios públicos: torre de enfriamiento, enfriamiento de componentes y agua de servicios.
- Marítimos: sentina y balasto, transporte, servicio de refrigeración y bomba contra incendios.

El modelo 3410 tiene cuatro ejes diferentes con sólo dos conjuntos de cojinetes, con cojinetes de bolas axiales o de empuje de doble fila y un cojinete de bolas de surcos profundos de una sola fila al final del acoplamiento. La carcasa se divide de manera horizontal, las mitades superior e inferior se sostienen con tornillos de cabeza y pasadores al costado de cada caja de empaquetadura para facilitar su desmontaje/montaje. Al igual que las bombas de agua sucia, se empezó con la construcción de las bases de hormigón armado con el fin de anclar las bombas y sus motores eléctricos. Se construyeron dos bases, una para cada conjunto (bomba y motor), quedando como se muestra en la siguiente figura:

Figura 60. **Construcción de bases para la instalación de bombas de agua limpia**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Construcción de bases para bombas.*

Para la instalación de las bombas y motores eléctricos, igualmente se utilizó la grúa marca Grove y el polipasto para alinear el motor y la bomba, y posteriormente ser anclados con tornillos a las bases. En la figura 61 se muestra el resultado de la instalación del motor y bomba # 2.

Figura 61. **Instalación de motor y bomba # 2, de agua limpia**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de motor y bomba # 2.*

Las dos bombas fueron utilizadas en agua para lavador de gases de la caldera #5 y arrastre de cenizas de calderas # 3, # 4, # 5 y # 6.

3.4.5.5. Bombas de floculante

Estas máquinas se utilizarán para el bombeo de floculante en solución (floculante y agua) almacenada en dos tanques destinados para dicho fluido. Se utilizarán dos bombas helicoidales de cavidad progresiva (bombas volumétricas rotativas de tornillo excéntrico), marca Nemo, de la empresa Netzsch, acopladas a cajas reductoras, diseñadas para el bombeo principalmente de medios con alto contenido de sólidos; alta y baja viscosidad; alta y baja abrasividad; medios agresivos y químicamente tóxicos; lubricantes y no lubricantes. Algunas características típicas de estas bombas son:

- Flujo continuo sin pulsación
- Alto rendimiento aún en bajas velocidades
- Precisión en el control de flujo (dosificación)
- Flexibilidad de armado
- Bajo valor de NPSH requerido

Los materiales de fabricación son:

- Hierro fundido, acero inoxidable 304 o 306, acero al carbono y otros.
- Estator en distintos componentes de goma resistente a la abrasión, al ataque químico o a altas temperaturas.
- Opcional en hierro fundido o PTFE (politetrafluoroetileno, más conocido como teflón).
- Junta del eje.
- Junta estándar por sello mecánico de efecto simple, opcional de efecto doble.
- Articulación.
- Tipo perno con sello mecánico o tipo junta universal.

Figura 62. **Sección de bomba volumétrica de cavidad progresiva marca NEMO BY**



Fuente: *Sección de bombas volumétrica*. http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/31551-8975030.jpg. Consulta: abril de 2015.

En los catálogos se muestra que la bomba # 1 modelo NM038BY01L06B, tiene un caudal máximo de 13 m³/h (57 gpm) y una presión máxima de 12 bar (174 psi); la bomba # 2 modelo NM031BY01L06B, tiene un caudal máximo de 6 m³/h (26 gpm) y una presión máxima de 12 bar (174 psi).

Al igual que las bombas de agua sucia, se empezó con la construcción de las bases de hormigón armado con el fin de anclar las bombas y sus motores eléctricos. Se construyó una sola base para las dos bombas y sus motores. La armadura quedó como se muestra en la figura 63, donde posteriormente se le agregó concreto.

Figura 63. **Armadura de la base para la instalación de los motores y bombas de floculante**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Armadura de la base.*

Después de agregarle concreto quedó idéntico a la figura 60, y después se le soldaron dos bancadas y en cada una se ancló una bomba por medio de cuatro tornillos y su respectivo motor eléctrico. La instalación de las bombas se realizó como se muestra en la siguiente figura:

Figura 64. **Instalación de bombas de floculante**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de bombas de floculante.*

Las dos bombas son de segunda mano, ya que se utilizaban para el bombeo de floculante en solución a los clarificadores, en el proceso de producción de azúcar del área de fábrica.

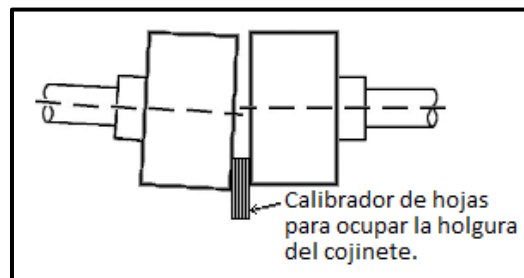
3.4.6. Alineación y acoplamiento de bombas con su elemento motriz (motor eléctrico)

Para el método de las alineaciones de todas las bombas, con sus motores instalados en la planta de tratamiento de agua con cenizas, se contó con una regla y un juego de calibradores de hojas. La alineación fue realizada por técnicos mecánicos del ingenio. Este método solo puede usarse si la superficie y los diámetros externos de las mitades del acoplamiento cuadran y son concéntricas con los orificios del acoplamiento (si estas condiciones no resultan convenientes para este método deberá usarse el método del comparador de carátula). El método se realizó en dos pasos fundamentales:

- Se midió con el calibrador de hojas entre las superficies de acoplamiento en intervalos de 90° para comprobar la alineación angular (se considera que la unidad posee una alineación angular cuando estas cuatro medidas son las mismas o están dentro de los márgenes de tolerancia recomendados).
- Se colocó una regla transversalmente entre ambos bordes del acoplamiento en sus cuatro lados para controlar la alineación en paralelo (se considera que la unidad posee una alineación en paralelo cuando la regla descansa en forma pareja transversalmente entre los dos bordes del acoplamiento en las cuatro posiciones).

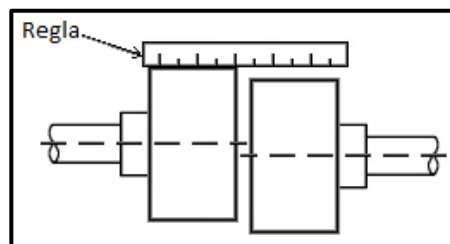
En las siguientes dos figuras se muestran los errores que se pueden cometer al realizar la alineación de una bomba y motor, utilizando el método descrito anteriormente.

Figura 65. **Alineación angular incorrecta**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

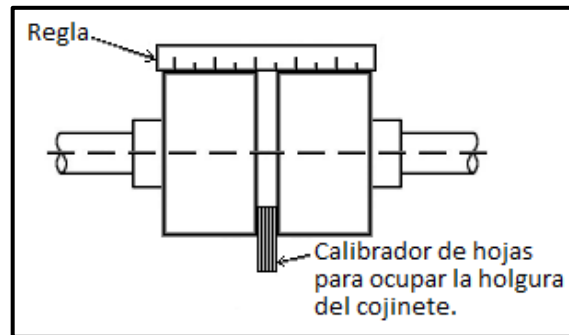
Figura 66. **Alineación en paralelo incorrecta**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

La alineación correcta de una bomba y motor utilizando dicho método se muestra en la figura de la página siguiente:

Figura 67. **Alineación correcta**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El acoplamiento que se utilizó en todas las bombas instaladas en la planta de tratamiento de agua con cenizas es de tipo flexible de rejilla metálica. Este tipo de acoplamiento básicamente se compone de dos mazas (de la bomba y el motor), un resorte metálico de rejilla, y un *kit* de cubierta dividida horizontalmente. El torque se transmite entre los dos ejes acoplados a través del resorte metálico de rejilla. En la siguiente figura se muestra la alineación que se realizó en la bomba # 1 de agua con cenizas con su motor eléctrico:

Figura 68. **Alineación de bomba # 1 son su motor eléctrico**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Alineación de bomba # 1.*

Después de la alineación se realizó el acoplamiento. Las rejillas que se utilizan se proporcionan en dos segmentos como se muestra en la siguiente figura:

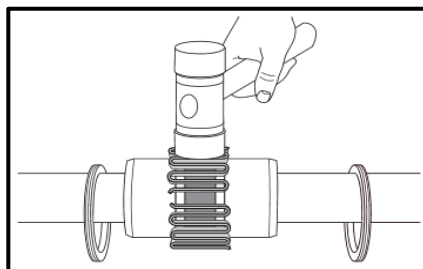
Figura 69. **Rejilla de acoplamiento**



Fuente: *Rejilla de acoplamiento*. <http://3.bp.blogspot.com/-bG4JTgTRX84/VIFQhPRPobI/AAAAAAAAArc/l1SvD-9x5dg/s1600/grid-coupling-grid-element.jpg>. Consulta: abril de 2015.

Antes de insertarla rejilla se aplicó lubricante (grasa) en la separación y las ranuras. La instalación se realizó extendiendo levemente la rejilla sobre los dientes de las mazas y luego se asentó con un martillo blando, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 70. **Inserción de rejilla de acoplamiento**



Fuente: Acoplamientos Falk™ Steelflex®. *Instalación y Mantenimiento*. <http://www.rexnord.com>. Consulta: abril de 2015.

La inserción de la rejilla para el acoplamiento de la bomba # 1 de agua con cenizas se muestra en la siguiente figura:

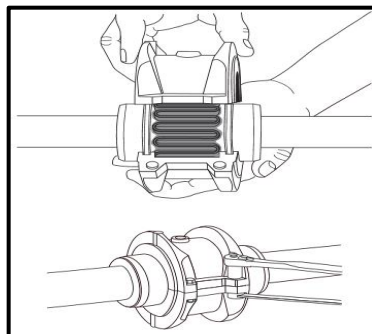
Figura 71. **Inserción de rejilla de acoplamiento de la bomba #1 de agua con cenizas con su motor eléctrico.**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Inserción de rejilla de acoplamiento.*

Después de la inserción de la rejilla se ensambló la cubierta dividida. Antes de instalar las cubiertas se aplicó grasa manualmente alrededor de la rejilla y entre los espacios de la misma, eliminando el exceso quedando al ras de la rejilla.

Figura 72. **Aplicación de grasa y ensamble de la cubierta dividida**



Fuente: Acoplamientos Falk™ Steelflex®. Instalación y Mantenimiento. <http://www.rexnord.com>.

Consulta: abril de 2015.

Como se mencionó anteriormente, las alineaciones de todas las demás bombas se realizaron de la misma manera que la bomba # 1 de agua con cenizas.

3.4.7. Construcción y/o instalación de tuberías

La tubería es empleada para transportar agua u otros fluidos de un punto a otro. Algunas tuberías fueron construidas y otras fueron adquiridas de fábrica. Únicamente se construyó tubería para la conducción de agua con cenizas. Para la instalación de las tuberías se utilizó polipasto y grúa móvil hidráulica.

3.4.7.1. Tubería para agua con cenizas (agua sucia)

Se construyeron tuberías de 8, 10 y 12 pulgadas de diámetro a base de láminas de acero inoxidable, utilizando soldadura al arco eléctrico. La lámina fue doblada o curvada en una máquina roladora (ver figura 73), ideal para dar forma curva a una lámina de metal.

Figura 73. **Máquina roladora eléctrica**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Máquina roladora eléctrica.*

En la figura 74 se muestra la construcción de un codo a 90°, a base de láminas de acero inoxidable curvadas en la máquina roladora, soldándose con electrodo E316L-16.

Figura 74. **Construcción de un codo a 90° de 12 pulgadas de diámetro a base de láminas de acero inoxidable**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Construcción de un codo.*

Al finalizar el montaje de la estructura, tanques y bombas, se procedió con la instalación de tuberías. La línea de tubería de agua sucia empieza desde los *scrubbers* de las calderas, llega al tanque de agua sucia y finaliza en las tolvas decantadora de lodos. Parte de la línea de tubería de agua sucia se instaló a 50 cm aproximadamente debajo de la tierra, debido a que ese lugar es transitable y obstaculiza el paso vehicular.

La tubería que va de los lavadores de gases de combustión hacia el tanque de agua con cenizas es de 12 pulgadas de diámetro y, debido a las medidas de succión y descarga de las bombas seleccionadas para el bombeo de agua sucia del tanque hacia las tolvas de decantación, la tubería de succión y descarga es de 10 y 8 pulgadas respectivamente. Para la instalación de la tubería subterránea, la zanja se realizó manualmente utilizando piochas, azadones y demás, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 75. **Realización de zanja para la instalación de tubería para agua con cenizas**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Realización de zanja para tubería.*

3.4.7.2. Tubería para agua limpia (agua clarificada)

La línea de tubería de agua limpia empieza de las tolvas decantadoras de lodos hacia el tanque de agua limpia, seguidamente va hacia los *scrubber* de las calderas donde se recircula. La línea de la tubería que va desde la salida de las tolvas decantadoras de lodos hacia el tanque de agua limpia es de 12 pulgadas de diámetro, de acero al carbono cédula 40 adquirida de fábrica. Una parte de la línea de tubería de agua limpia se instaló a 50 cm aproximadamente debajo de la tierra, en la misma zanja donde se instaló la tubería de agua sucia (ver figura 75).

La tubería fue modificada de acuerdo a los requerimientos del diseño que se realizaron. Al modificar se soldó con electrodos E6011 y E7018. En la figura 70 (a) se muestra un trabajador soldando una copa para taponear una tubería que se instaló en el área de salida de agua limpia de las tolvas decantadoras de lodos, como se muestra en la figura 76 (b).

Figura 76. **Modificación de tubería para agua limpia**



(a)



(b)



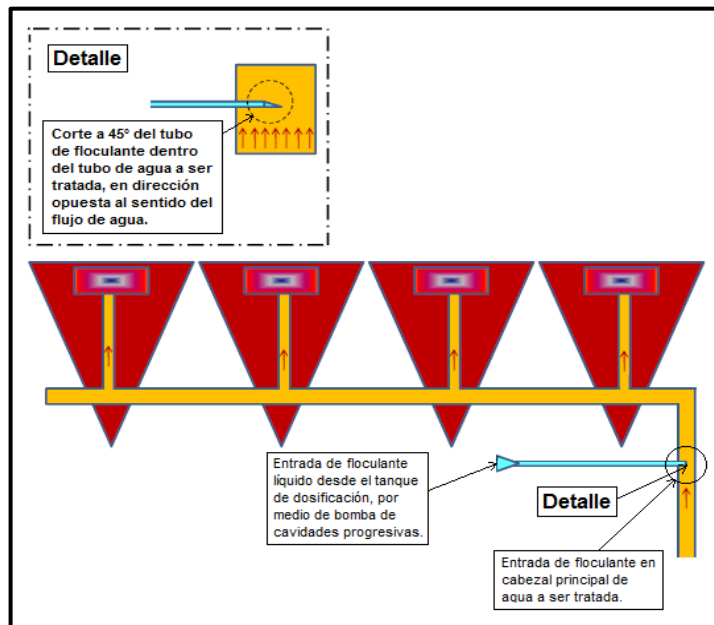
(c)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Modificación de tubería.*

3.4.7.3. Tubería para floculante

La instalación de esta tubería servirá para transportar floculante líquido desde los tanques de dosificación hasta la línea de descarga de las bombas de agua sucia. En la línea de succión de las bombas de floculante se utilizó tubería de 3 pulgadas de diámetro y la línea de descarga de 2 pulgadas de diámetro, esto debido al diámetro de succión y descarga de las bombas que se seleccionaron. El lugar y diseño de inyección del floculante líquido fueron propuestos por el proveedor del producto de la empresa Componentes Industriales, S. A. (donde se adquiere el producto), quien propuso inyectarlo en la tubería de descarga de las bombas de agua sucia. El diseño se muestra en la siguiente figura:

Figura 77. Detalle de la inyección de floculante



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Se utilizó tubería de acero al carbono cédula 40. Al ser modificado se soldó con electrodos E6011 y E7018. La instalación de la línea de tubería se muestra en la figura 78a; en la figura 78(b) se muestra el resultado de la instalación de la entrada de floculante.

Figura 78. **Instalación de tubería de floculante**



(a)



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de tubería.*

3.4.7.4. Tubería para lechada de cal

La instalación de esta tubería servirá para transportar por gravedad cal hidratada líquida (lechada de cal) de los tanques de preparación hacia el tanque de agua con cenizas donde está el agua a tratar. La dosis y preparación de la

solución se detalla más adelante. La tubería es de 4 pulgadas de diámetro y lleva dos válvulas manuales y una válvula automática para regular el caudal. En la figura 79 se muestra la instalación de la tubería de lechada de cal.

Figura 79. **Instalación de tubería de lechada de cal**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de tubería de lechada de cal.*

3.4.7.5. Tubería para agua filtrada de lodos

Estas tuberías son las que trasladarán el agua filtrada del lodo que se extrae del fondo de las tolvas o celdas de decantación al tanque de agua sucia. La filtración se obtiene del filtro rotativo y la prensa de deshidratación de lodos. El agua filtrada obtenida del filtro rotativo se traslada en tubería de 12 pulgadas de diámetro hacia el tanque de agua con cenizas. En la figura 80 se muestra la instalación de la línea de tubería, iniciando en la salida del filtro rotativo.

Figura 80. **Instalación de tubería para agua filtrada del filtro rotativo**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Tubería para agua filtrada.*

El agua filtrada de la prensa de deshidratación de lodos se traslada en tubería de 6 pulgadas de diámetro hasta el tanque de agua con cenizas. La línea de la tubería ensamblada e instalada se muestra en la figura 81 respectivamente.

Figura 81. **Ensamblaje e instalación de tubería para agua filtrada de la prensa deshidratadora de lodos**



(a)

Continuación de la figura 81.



(b)

Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Ensamblaje de tubería para agua filtrada.*

Por las grandes cantidades de partículas que todavía contendrá el agua obtenida del filtro y de la prensa, se enviará por gravedad al tanque de agua con cenizas para ser enviado nuevamente al proceso de clarificación en las tolvas decantadoras. La mayor extracción de agua de los lodos se realizará en el filtro rotativo, por tal motivo la tubería que se utilizará para la conducción del agua extraída de dicho filtro es de mayor diámetro, en comparación con la tubería que conducirá el agua que se extraerá de la prensa de tornillo.

3.4.7.6. Tubería para llenado y reposición de agua

Para el llenado de los tanques de preparación de floculante, preparación de lechada de cal y reposición de agua durante el proceso de operación, se realizará a través de las bombas *make-up* de las torres de enfriamiento, o bien de las bombas de enfriamiento de compresores del ingenio. La tubería proveniente de las bombas *make-up* es de 6 pulgadas de diámetro, y las bombas de enfriamiento de compresores tienen 2 pulgadas de diámetro.

3.4.8. Instalación de equipos de automatización industrial

El sistema cuenta con algunos componentes automatizados, esto permitirá que la supervisión sea mínima, se puedan controlar parámetros y llevar historiales de datos a través de un computador.

3.4.8.1. Sistema de dosificación automática de lechada de cal

Este sistema se encargará de controlar la dosificación de lechada de cal hacia el flujo de agua que se depositará en el tanque de agua con cenizas, de acuerdo al valor del pH. Un sensor de pH (ver figura 82) de agua envía una señal a un transmisor y este envía otra señal al sistema DeltaV, que mediante un punto de referencia (*set-point*) envía otra señal a un convertidor i/p de corriente a presión, para que un actuador neumático haga trabajar la válvula de paso de flujo de lechada de cal. Para la alimentación y funcionamiento del actuador, se conecta a la línea de aire comprimido del ingenio que oscila en 90 psig de presión.

En el lazo se requiere una potencia de 4 mA a 20 mA para el funcionamiento de todos los componentes electrónicos internos, donde la apertura de la válvula inicia con 4 mA y abre completamente con 20 mA, y se requiere un suministro de presión neumática de 1,4 bar a 7 bar (20 psi a 102 psi), para que la válvula funcione correctamente. El equipo de sensor y transmisor instalado en el tanque de agua con cenizas se muestra en la figura de la página siguiente:

Figura 82. **Sensor y transmisor de pH de agua con cenizas**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Sensor y transmisor de Ph.*

En la figura anterior el electrodo de vidrio que se ve en la punta de la barra es el que hace contacto con el agua para sensar el valor de su pH. Esta barra se introduce en el tubo inclinado soldado al tanque que se ve más al fondo. El electrodo de vidrio del sensor proporciona una excepcional resistencia a la degradación térmica, que puede trabajar con un fluido de una temperatura de hasta 150 °C y 400 psig de presión. El tipo de actuador que se instaló para la dosificación de floculante automática es de la serie 93, tiene un mecanismo de doble pistón y de piñón y cremallera diseñado para automatizar las válvulas de un cuarto de vuelta. Es un actuador de retorno que tiene agregados cartuchos de resorte para jalar los pistones mediante la fuerza de resorte, en caso de pérdida de presión de aire comprimido. Estos tipos de actuadores están diseñados para montarse directamente en la placa superior de las válvulas Bray. Antes de montar un actuador sobre la válvula, es recomendable lubricar el orificio de salida del actuador con grasa espesa para hacer más fácil quitar el actuador del vástago de la válvula, incluso después de años de servicio. La instalación del actuador neumático en la válvula para la dosificación de lechada de cal se muestra en la siguiente figura:

Figura 83. **Instalación de válvula y su actuador neumático para la dosificación de lechada de cal**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de válvula y actuador neumático.*

El fluido recomendado para su funcionamiento es aire comprimido industrial seco.

3.4.8.2. Medición de flujo de floculante líquido

Para la medición del flujo de floculante líquido que se dosifica al flujo de agua con cenizas, se utilizó un transmisor de flujo magnético de serie 8700, modelo 8712C/U/H, hecho en Chihuahua, México, esto con el fin de verificar la cantidad adecuada de acuerdo a los cálculos realizados. Si se verifica un caudal inadecuado, se modifica la velocidad de la bomba de floculante en una pantalla de control de parámetros que se detallará más adelante. Un transmisor de flujo magnético de serie 8700 mide el caudal volumétrico mediante la detección de la velocidad de un líquido conductor que pasa a través de un campo magnético. La instalación se muestra en la siguiente figura:

Figura 84. **Instalación de medidor de flujo de floculante líquido**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de medidor de flujo.*

3.4.8.3. Medición de flujo de agua con cenizas y agua clarificada

La medición de ambos caudales tiene como objetivo verificar que sean los mismos y pueda procederse a la dosificación de floculante adecuada. Debido a pérdidas de agua por evaporación y por humedad de las cenizas que se extraen, el nivel del tanque de agua clarificada se repone con las bombas *make-up*. Para ambas mediciones de flujo se utilizaron transmisores de flujo magnético de la misma serie y modelo del transmisor para medición de floculante, igualmente hecho en Chihuahua, México. La instalación del transmisor de flujo magnético para agua con cenizas se muestra en la siguiente figura:

Figura 85. **Instalación de transmisor de flujo de agua con cenizas**



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de transmisor de flujo.*

Las características del transmisor de flujo magnético se muestran en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Características de transmisor de flujo magnético de agua con cenizas**

| | |
|--|-----------------------------------|
| Model | 8711TSE080U1 |
| Voltaje máximo | 40 V (entrada); 5 V (salida) |
| Corriente máximo | 0,5 A (entrada); 0,20 mA (salida) |
| Potencia máxima | 20 W (entrada); 1 mW (salida) |
| Serial No. | 196745 |
| Presión máxima de proceso a 100 °F (38 °C) | 740 PSI / 5.10 MPA |
| Temperatura máxima de proceso | 300 °F (149 °C) |
| Límite de temperatura ambiental | -29 °C a +60 °C |

Fuente: elaboración propia.

La instalación del transmisor de flujo magnético para agua clarificada se muestra en la siguiente figura:

Figura 86. **Instalación de transmisor de flujo de agua clarificada**



Fuente: ingenio Madre Tierra. *Instalación de transmisor de flujo.*

Las características del transmisor de flujo magnético se muestran en la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Características de transmisor de flujo magnético de agua clarificada**

| | |
|---------------------------------|--------------|
| Model | AXF200C |
| Presión máxima del fluido | 1 MPA |
| Temperatura del fluido | -10 a 100 °C |
| Límite de temperatura ambiental | -10 a 60 °C |

Fuente: elaboración propia.

3.4.8.4. Instalación de medidores de nivel para los tanques de agua con cenizas y agua clarificada

Estos equipos son fundamentales para verificar el nivel del líquido de ambos tanques, ya que sin ellos se puede perder el control y pueden quedarse vacíos, llegando a dañar las bombas, ya que sin líquido se sobrecalientan y se dañan. Para la medición del nivel de agua sucia y agua clarificada se instalaron transmisores de presión Rosemount modelo 2051. Este transmisor proporciona una medición fiable de presión diferencial manométrica y absoluta, con una variedad de protocolos de salida, materiales y conexiones de proceso. Gracias a la plataforma flexible Conaplar, puede aplicarse para la medición de presión, nivel y caudal, y además reduce los costos de mantenimiento.

Características y beneficios

- Conexiones de proceso flexibles Coplanar tradicionales, en línea y de nivel para cualquier requisito de instalación.
- Los protocolos incluyen 4-20 mA HART, FOUNDATION *fieldbus*, PROFIBUS PA, 1-5 VCC HART *Lowpower*, para una sencilla integración para cualquier *host*.
- Acero inoxidable, aleación C-276 y piezas en contacto con el proceso de tántalo para la compatibilidad con sus aplicaciones.
- Pantalla LCD totalmente configurable para visualizar las variables del proceso, los porcentajes de rangos y los mensajes de diagnóstico.
- Alojamiento de aluminio y acero inoxidable para la compatibilidad con cualquier ambiente.

En la siguiente figura se muestra la instalación del transmisor de nivel del tanque de agua con cenizas:

Figura 87. **Instalación de transmisor de nivel de tanque de agua con cenizas**

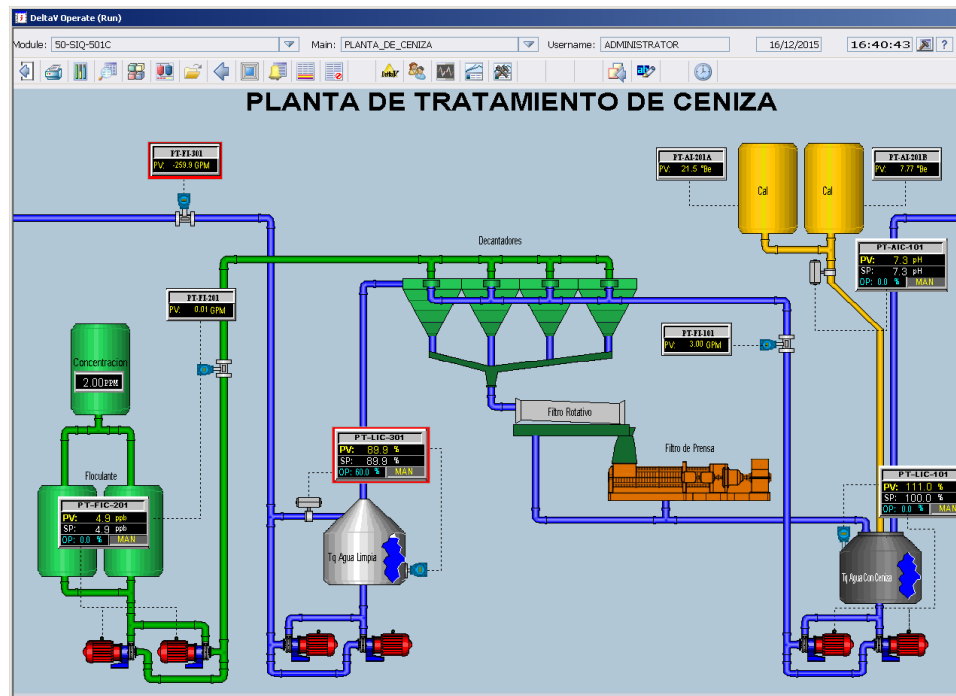


Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Instalación de transmisor de nivel.*

Para no detener el funcionamiento de las bombas de agua clarificada debido al nivel bajo de agua en el tanque, se instaló una válvula de recirculación, para que al momento de descender el nivel, la válvula abra automáticamente y recircule el agua hacia el tanque nuevamente. La válvula y su actuador son idénticos a los que se utilizaron para el control de dosificación de lechada de cal.

El arranque automático y variación de velocidad de las bombas de agua con cenizas y floculante, la reposición automática de agua del tanque de agua tratada, todos estos parámetros pueden ser variados, ajustados y visualizados en línea, gracias a un software de control DeltaV, en el cual el operador de consola podrá variar los parámetros y controlar el sistema. El sistema DeltaV elimina la complejidad de operación y el riesgo del proyecto debido a lo moderno y fácil de utilizar. La pantalla de control de parámetros de la planta de tratamiento de agua con cenizas realizado con DeltaV se muestra en la siguiente figura:

Figura 88. Pantalla de supervisión y control de parámetros de la planta de tratamiento de agua con cenizas



Fuente: Ingenio Madre Tierra. *Pantalla de supervisión.*

3.5. Neutralización de la acidez del agua con cenizas

La neutralización ácida es un procedimiento de adición de un agente alcalinizante (aumenta el pH). En este caso se utilizará lechada de cal hidratada como agente alcalinizante, para elevar el pH del agua a tratar al punto de neutralización ($\text{pH} = 7$), ya que el que contiene es de 3,1, siendo un agua muy ácida y corrosiva que desgastaría rápidamente las tuberías y además se necesita un pH neutro para una floculación más efectiva. La dosis que se aplica es de 80 mg/L (80 ppm), consumiéndose 26 165 kg/mes en un caudal de 2 000

gpm. La preparación se realiza a una concentración de 100 g/L (10 %) que corresponde a 7 grados Baumé (7 °Bé) aproximadamente.

3.6. Floculación

La floculación se da tras la adición de una sustancia polimérica llamada floculante, cuya función más práctica es envolver los coágulos de impurezas formados para que estos obtengan mayor peso molecular y, como consecuencia, se precipiten al fondo de las tolvas en un tiempo considerablemente corto. El floculante es un agente de macrofloculación y es agregado al caudal antes de entrar a las tolvas para la decantación de las cenizas. La dosificación ideal depende principalmente de la cantidad de cenizas contenidas en el agua.

3.6.1. Producto

El producto que se utilizará es poliacrilamida catiónica, marca Superfloc de grado C-492HMW, hecho en Estados Unidos. Son floculantes catiónicos altamente efectivos de alto peso molecular; sólidos de forma granular (similares a los granos de azúcar) y deben ser aplicados en forma de solución. Acondicionan con eficacia los sólidos para las operaciones de deshidratación y ayudan en los procesos de clarificación de agua en una amplia variedad de industrias. Muestran un excepcional desempeño en las separaciones sólido-líquido en un amplio rango de condiciones. A continuación se presenta la información más importante del producto:

3.6.1.1. Seguridad

El derrame del polímero mojado es muy resbaladizo y puede provocar caídas, que se deben recoger antes de lavar con agua. Evitar que el líquido ingrese a desagües sanitarios. El producto no presenta riesgos humanos ni ambientales.

3.6.1.2. Manipulación y almacenamiento

Para la manipulación, mantener buena limpieza para controlar las acumulaciones de polvo. Las soluciones no son más corrosivas que el agua y los materiales recomendados para la construcción de recipientes incluyen acero inoxidable, fibra de vidrio, plástico y recubrimientos epóxicos o de vidrio. La vida útil de estos productos es de 24 meses, cuando se almacenan en empaques sin abrir en atmósfera seca y a temperatura no superior a los 40 °C (104 °F). Para evitar una posible degradación del producto y la corrosión del equipo, no deben utilizarse contenedores ni equipo de hierro, cobre o aluminio. El material es higroscópico (absorbe humedad del ambiente) y no deberá exponerse a la humedad, con el fin de mantener su integridad.

3.6.1.3. Estabilidad y reactividad

- Material estable; evitar el contacto con materiales alcalinos, los cuales degradarán el polímero, así como con agentes oxidantes fuertes.
- No se produce polimerización.
- Productos de descomposición peligrosos: dióxido de carbono, monóxido de carbono, amoníaco, óxidos de nitrógeno, cloruro de hidrógeno.

3.6.1.4. Propiedades físicas y químicas

Algunas propiedades físicas y químicas del producto se presentan en la siguiente tabla:

Tabla IX. **Propiedades físicas y químicas del floculante Superfloc C-492HMW**

| | |
|---|----------------------------------|
| Color | Blancuzco |
| Aspecto | Polvo cristalino |
| Olor | Ninguno |
| Temperatura de ebullición/rango | No aplicable |
| Temperatura de fusión | No disponible |
| Presión de vapor | No aplicable |
| Gravedad específica | 0,75 (densidad de volumen, kg/L) |
| Densidad de vapor | No aplicable |
| Carga relativa | Baja |
| Peso molecular | Muy alto |
| Viscosidad a 25 °C (cP/mPa·s) | |
| 0,10% | 120 |
| 0,25% | 300 |
| % volátil (por peso) | 7 – 8 |
| pH solución al 0,5% (25 °C) | 3 – 5 |
| Saturación en aire (% en volumen) | No aplicable |
| Índice de evaporación | No aplicable |
| Solubilidad en el agua | Limitado por la viscosidad |
| Contenido orgánico volátil | No disponible |
| Punto de inflamación | No aplicable |
| Límites de inflamabilidad (% por volumen) | No aplicable |
| Temperatura de autoignición | > 150 °C |
| Temperatura de descomposición | > 150 °C |
| Coefficiente de reparto (n-octanol/agua) | No aplicable |

Fuente: KEMIRA. *Ficha de datos de seguridad de floculante Superfloc C-492HMW*. P. 3.

3.6.1.5. Aplicaciones

Estos productos pueden ser benéficos en cualquier proceso de separación sólido-líquido. Están especialmente recomendados para:

- Calificación de agua

- Deshidratación por medio de filtros banda, centrifugas y filtros prensa
- Flotación por medio de aire disuelto
- Filtración
- Espesado

3.6.1.6. Beneficios

- Mejoran los resultados y la formación de sólidos.
- Remoción altamente eficaz de sólidos.
- Efectivos en un amplio rango de pH, no modifican el pH del sistema.
- Uso económico, eficaces a bajas dosis.
- El producto seco minimiza las necesidades de espacio de almacenamiento.

3.6.1.7. Distribución

Estos productos se distribuyen en sacos de 25 kg y 750 kg resistentes a la humedad. En caso particular se adquiere el producto en sacos de 25 kg (55 lb).

3.6.2. Dosificación del producto

Las soluciones madre se pueden preparar a una concentración de hasta un 0,5 % a través de una unidad de preparación automatizada o por lotes. Las soluciones se deben dejar añejar (madurar) unos 30 minutos a 60 minutos para lograr la máxima eficacia. Para la transferencia de polímeros debe evitarse la utilización de bombas centrifugas.

3.6.3. Procedimiento para la preparación del floculante en solución

Para la solución se utiliza agua a temperatura ambiente (en esta región Sur la temperatura ambiente varía en un rango aproximado de 25 °C a 35 °C). Teniendo en cuenta eso, la preparación de la solución se realiza en un tanque con agitador instalado, teniendo una capacidad máxima de 2 000 litros (528 galones), pero, por la instalación de la base del motor y/o el acoplamiento del eje del agitador que ocupa una fracción del volumen del tanque, la solución se preparará con el volumen restante de aproximadamente 1850 litros (488 galones). La preparación de la solución se realiza a una concentración de 1,2 g/L (0,12 %). Los pasos son los siguientes:

- Agregar los 1 850 litros de agua (agua no desmineralizada). Al iniciar la operación de la planta, dicha agua se toma solamente del canal que proviene del nacimiento Xatá, a través de las bombas *make-up* de las torres de enfriamiento o bien de las bombas de enfriamiento de compresores; y al normalizar la operación se tomará agua clarificada obtenida del sistema.
- Agitar el agua a través del agitador mecánico instalado dentro del tanque.
- Agregar 2,22 kg (4,9 lb) de floculante al agua en movimiento de forma lenta, para que no se formen coágulos, que impiden tener una buena disolución.
- Mantener en agitación la solución durante 1 hora aproximadamente y luego vaciarla a uno de los dos tanques de dosificación instalados en la parte inferior para su posterior dosificación. El tiempo de retención del floculante no debe ser mayor a 6 horas, para evitar que sufra

degradación por competencia de la dureza o impurezas presentes en el agua.

3.7. Descripción del proceso

El flujo de agua con cenizas saliente de los lavadores de gases de combustión de las calderas es enviado por gravedad en tubería de acero inoxidable de 12 pulgadas de diámetro al tanque de agua con cenizas, donde se le aplica lechada de cal para su neutralización ácida, luego es bombeado por unas bombas centrífugas Goulds SRL-C a las tolvas decantadoras de lodos en tubería de acero inoxidable de 8 pulgadas de diámetro, donde se le inyecta floculante líquido transportado en tubería de acero al carbono de 2 pulgadas de diámetro, para ser impulsado a través de bombas Nemo de cavidades progresivas. El flujo de agua con cenizas al que se le ha disuelto floculante ingresa en la parte frontal de las tolvas y sale por rebalse del lado opuesto (parte posterior) ya clarificado, donde luego es transportado por gravedad hacia el tanque de agua limpia, mediante una tubería de 12 pulgadas de diámetro de acero al carbono, cédula 40. El agua clarificada del tanque de agua limpia es enviada para su recirculación a los lavadores de gases de combustión, mediante unas bombas centrífugas Goulds 3410 en una tubería de acero al carbono de 8 pulgadas de diámetro. Y el agua obtenida del filtro y de la prensa de tornillo es enviada nuevamente al tanque de agua para ser enviada a las tolvas de decantación para su tratamiento.

3.8. Perfil del sistema

El sistema cuenta con alternativas en caso de ocurrir fallo de algún equipo, ya que es de suma importancia el lavado de gases de combustión de las calderas, debido a la acumulación de cenizas que podrían conducir al paro

de las calderas. Algunas de las alternativas importantes con que cuenta el sistema son:

- La conducción de los lodos decantados de las tolvas cuenta con un *bypass*, debido a posibles fallos o mantenimiento del filtro rotativo, o bien de la prensa deshidratadora de lodos, en donde el lodo pasa directamente al camión recolector, sin ser deshidratado.
- Se realizó la instalación de dos bombas en la estación de bombeo de agua sucia, agua limpia y floculante, debido a mantenimientos o a posibles fallas que puedan surgir en las bombas durante la operación del sistema. Una de ellas permanece en espera y entraría a trabajar al momento de detectar problemas en la otra bomba (bomba en operación) y así sucesivamente, esto con el objetivo de no interrumpir la operación del sistema.

El sistema cuenta con las siguientes características importantes:

- El sistema cuenta con tolvas de sedimentación para tratar un caudal máximo de 8 000 gpm, debido a que a un mayor caudal, el tiempo de retención del agua en las tolvas disminuye, resultando una deficiente clarificación del agua obtenida, ya que contendrá un mayor porcentaje de cenizas.
- El sistema trabajará como un ciclo cerrado, ya que la reposición de agua que se pierde por evaporación y en humedad de las cenizas es mínima.
- La confiabilidad de celdas estáticas es buena, ya que el sistema se conforma de cuatro celdas y el mantenimiento o limpieza de una de ellas no produciría el paro del sistema.

- El sistema cuenta con algunos componentes automatizados, esto permitirá que la supervisión sea mínima, se puedan controlar parámetros y llevar historiales de datos a través de un computador.

3.9. Operación normal

Se explica a continuación este tipo de proceso.

3.9.1. Evaluación

La evaluación de la puesta en marcha y operación del equipo del sistema debe demostrar que los equipos operan adecuadamente de acuerdo a las especificaciones del diseñador/proveedor, para lo cual se debe inspeccionar que los servicios necesarios para la operación funcionen correctamente, realizando pruebas de operación o funcionamiento de los equipos.

3.9.2. Prueba de funcionamiento de equipos

En esta prueba se comprueba y corrige (si hubiese fallo) el funcionamiento de los equipos, iniciando con el arranque de los motores eléctricos en vacío (no acoplados) y con carga. La corriente eléctrica (A) consumida en los motores eléctricos obtenida en esta prueba se muestra en la tabla VI. La prueba de funcionamiento de los equipos con carga total se realizará en el arranque del sistema.

3.9.3. Puesta en marcha del sistema

Para la puesta en marcha del sistema se coordina con el departamento eléctrico e instrumentación, personal que operará la planta y supervisión del montaje y mantenimiento del departamento de cogeneración.

3.9.3.1. Procedimiento previo a la puesta en marcha

- Verificar el estado mecánico de todos los equipos del sistema.
- Verificar el nivel de lubricante, limpieza y conexiones.
- Realizar prueba de humedad a los motores eléctricos.
- Verificar que el floculante líquido y la lechada de cal estén debidamente preparados y que haya la cantidad necesaria para una operación en régimen continuo.
- Llenar las tolvas de decantación con agua limpia hasta su nivel de operación.
- Estar coordinados sobre la metodología a emplear del procedimiento de arranque del sistema.

El sistema no debe iniciar su operación con los decantadores vacíos para prolongar la ocurrencia de un taponamiento.

3.9.3.2. Procedimiento para la puesta en marcha

Al ejecutar el procedimiento mencionado en el inciso anterior, se procedió a lo siguiente:

- Llenar el tanque de agua con cenizas, modificando la dirección del flujo en la válvula de 3 vías, ubicada en la línea de tubería de agua con cenizas.
- Dosificar lechada de cal hidratada en el tanque de agua con cenizas y encontrar el punto adecuado del pH.
- Llenar el tanque de agua limpia a través de las bombas *make-up*.
- Iniciar el bombeo de agua con cenizas hacia las tolvas de decantación, dejando abiertas las 4 válvulas de entrada a un 25 %.
- Iniciar con la dosificación de floculante líquido al flujo de agua con cenizas, antes de ingresar a las tolvas de decantación.
- Arrancar el filtro rotativo y la prensa de tornillo.
- Colocar un camión recolector de cenizas en la descarga de la prensa de tornillo.
- Iniciar la descarga de lodos por la tubería de fondo de las tolvas, arrancando las válvulas rotativas y regulando con las válvulas manuales.
- Iniciar el bombeo de agua limpia para su recirculación hacia los lavadores de gases de combustión de calderas.
- Hacer el cambio de válvulas, abriendo la válvula de agua clarificada de la planta de tratamiento y cerrando la válvula de la línea de agua de fábrica.
- Balancear el proceso con el flujo óptimo para los lavadores de gases, manteniendo el mismo nivel de agua en el tanque de agua sucia y el tanque de agua limpia, reponiendo agua con las bombas *make-up* en el tanque de agua limpia.

Para la puesta en marcha realizada en la planta de tratamiento de agua con cenizas se encontraron anomalías, que posteriormente fueron corregidas. Estas fueron:

- Fallo en motor eléctrico de válvula rotativa # 1.

- Ubicación de transmisor de nivel de tanque de agua sucia por debajo del rebalse, provocando que el agua salga por el orificio del transmisor.

Los parámetros medidos en los motores eléctricos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla X. **Parámetros medidos en los motores eléctricos**

| No. | ESPECIFICACIÓN DEL EQUIPO | DATOS NOMINALES DEL EQUIPO ^[a] | | | PRUEBA DEL EQUIPO | | | |
|-----|---------------------------------------|---|-------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|
| | | Potencia (HP) | Corriente eléctrica (A) | Velocidad (rpm) | Frecuencia (Hz) | Corriente eléctrica consumida (A) | | Sentido de rotación |
| | | | | | | En vacío (no acoplado) | Con carga (acoplado) | |
| 1 | Motor # 1, agua sucia | 200 | 227 | 1190 | 50 ^[b] | 84 | 150 | CW |
| 2 | Motor # 2, agua sucia | 200 | 227 | 1190 | 50 ^[b] | 86 | 145 | CW |
| 3 | Motor # 1, agua limpia | 200 | 225 | 1785 | 60 | 66 | 202 | CCW |
| 4 | Motor # 2, agua limpia | 200 | 223 | 1780 | 60 | 64 | 185 | CW |
| 5 | Motor # 1, válvula rotativa | 1.5 | 2.5 | 1740 | 35 ^[b] | 0,8 | 1,8 | CCW |
| 6 | Motor # 2, válvula rotativa | 0.5 | 1.1 | 1725 | 30 ^[b] | 0,9 | 0,8 | CCW |
| 7 | Motor # 3, válvula rotativa | 0.5 | 1.1 | 1725 | 30 ^[b] | 0,8 | 1,1 | CCW |
| 8 | Motor # 4, válvula rotativa | 1.5 | 2.2 | 1725 | 30 ^[b] | 0,8 | 1 | CCW |
| 9 | Motor # 1, floculante | 3 | 4.6 | 1700 | 35 ^[b] | 1,8 | 3,5 | CCW |
| 10 | Motor # 2, floculante | 2 | 3.06 | 1740 | 45 ^[b] | 0,9 | 2,2 | CCW |
| 11 | Motor, agitador de floculante | 1.2 | 1.9 | 1750 | 60 | 0,8 | 1 | CW |
| 12 | Motor # 1, agitador de lechada de cal | 1 | 1.5 | 1718 | 60 | 0,9 | 1 | CW |
| 13 | Motor # 2, agitador de lechada de cal | 3.5 | 5.3 | 1718 | 60 | 3,7 | 3,9 | CW |
| 14 | Motor, filtro rotativo (trommel) | 5 | 6.5 | 1745 | 60 | 3,1 | 3,8 | CW |
| 15 | Motor, prensa deshidratadora de lodos | 40 | 47.6 | 1185 | 60 | 15 | 18 | CW |

[a] Los motores eléctricos operan con voltaje de 440 V o 460 V.
[b] Motor con variador de frecuencia.
CW Rotación en sentido horario (clockwise).
CCW Rotación en sentido antihorario (counterclockwise).

Fuente: elaboración propia.

3.10. Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento que se realizarán a la planta de tratamiento de agua con cenizas ya sea en operación o en tiempo de reparación son: mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

3.10.1. Actividades de mantenimiento en tiempo de operación

En tiempo de operación, se realizará a los equipos un mantenimiento preventivo y predictivo, para asegurar su buen funcionamiento y ajuste máximo de la vida útil, para así reducir la necesidad de usar el mantenimiento correctivo, minimizando principalmente el efecto negativo del funcionamiento de la operación. Para realizarle mantenimiento preventivo a los equipos se llevará un historial, con el objetivo de planificar su intervención ajustada a la vida útil, mediante chequeos rutinarios. Entre ellos se mencionan:

- Lubricación adecuada
- Fugas de líquidos
- Instalación adecuada (alineación adecuada)
- Limpieza
- Enfriamiento
- Medición de temperatura (con termómetro infrarrojo)

Básicamente, para realizar dichos chequeos debe tenerse apoyo en el conocimiento de la máquina con base en la experiencia y los datos históricos obtenidos de la misma. El historial consiste en el registro de desempeño de cada equipo, como el tiempo de parada, tiempo de operación, cantidad de fallas, fallas mayores, actividades de mantenimiento realizadas y costo de las mismas.

Y, para un mejor control de los equipos en operación, se les realizará un mantenimiento predictivo, con el objetivo de determinar el estado de los equipos y predecir o detectar alguna falla antes de que suceda, para poder corregirla en un período planificado. Las técnicas se basan en ensayos no destructivos, entre ellos:

- Mediciones eléctricas
- Termografías
- Análisis de vibraciones
- Análisis de ultrasonido

3.10.2. Actividades de mantenimiento en tiempo de reparación

En tiempo de reparación, se lleva a cabo el paro planificado de equipos, y es cuando se realizará mantenimiento programado (mantenimiento preventivo programado) a los equipos e instalaciones, que constituyen series de acciones necesarias para alargarles la vida útil, asegurando un buen funcionamiento y fiabilidad para el tiempo de operación, mediante la revisión, reparación o reemplazo del equipo, previniendo suspensión de operación del sistema. Entre las acciones a realizar están:

- Evaluación del estado de rodamientos de los diferentes equipos.
- Chequeo de estopas y prensaestopas.
- Inspección de sellos mecánicos y su sistema de enfriamiento.
- Chequeo de impulsores de bombas.
- Inspección de sellos y medallas de las válvulas.
- Verificación de mecanismos rotatorios, por medio de desarme e inspección de sus componentes de forma visual y/o con uso de líquidos penetrantes como ensayo no destructivo.

- Análisis de aceite.
- Inspección de tuberías, por manejo de material abrasivo.
- Chequeo general de camión recolector de cenizas.

3.10.3. Costos de operación y mantenimiento del proyecto

El costo para la operación del sistema durante los 6 meses del tiempo de zafra se divide en cuatro secciones, como se muestra en la tabla VIII. La energía que consume es dada por la planta de la caldera # 8, y se comprará al Sistema Interconectado Nacional a un precio alrededor de \$0,077 por kWh. Debe tomarse en cuenta que el precio de la energía cambia en función de la oferta y la demanda cada hora.

Tabla XI. Costo de operación del sistema en tiempo de zafra (6 meses)

| Sección | Consumo del producto (kg/día) | Consumo de potencia eléctrica (kW) | Cantidad de operadores (cantidad/mes) | Costo del producto (Q/kg) | Consumo de energía eléctrica (kWh/6 meses) | Costo de operadores (Q/mes) | Costo semestral (Q/6 meses) |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| Floculante | 27,10 | - | - | 46,64 | - | - | 230 670,00 |
| Cal | 1 450,00 | - | - | 1,35 | - | - | 357 244,00 |
| Energía eléctrica | - | 350,00 | - | - | 1 533 000,00 | - | 919 800,00 |
| Operadores | - | - | 4,00 | - | - | 3 800,00 | 91 200,00 |

Total costo semestral **Q 1 598 914,00**

Fuente: elaboración propia.

El costo de mantenimiento del sistema para realizar en el tiempo de reparación (no zafra) se describe en la tabla IX. Pero el mantenimiento del

sistema puede a veces no durar los 6 meses del tiempo de reparación, por lo tanto el costo de la mano de obra variaría.

Tabla XII. **Costo para el mantenimiento del sistema en tiempo de reparación (no zafra)**

| Descripción | Costo |
|--|---------|
| Mantenimiento de bombas, motores, variadores, tuberías, válvulas, etc. | 175 000 |
| Mantenimiento de camiones | 50 000 |
| Técnicos en mantenimiento | 45 000 |

Total costo **Q 270 000**

Fuente: elaboración propia.

3.11. Eficiencia

A continuación se presentan procedimientos para calcular la eficiencia de remoción de las cenizas contenidas en el agua que provienen de los lavadores de gases de combustión de calderas, realizados en la planta de tratamiento (a base de floculante), específicamente en las celdas o tolvas decantadoras de lodos. También se determinará la eficiencia de remoción de las partículas o cenizas contenidas en los lodos que se extraen del fondo de las celdas. Las máquinas que hacen esta función son el filtro rotativo y la prensa de deshidratación. La eficiencia de remoción de particulado de ceniza en un sistema de tratamiento de aguas residuales viene dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100$$

donde:

E = Eficiencia de remoción (%)

So = Particulado de ceniza entrante

S = Particulado de ceniza saliente

3.11.1. Eficiencia de remoción de las cenizas contenidas en el agua proveniente de los *scrubbers*

Para determinar la eficiencia del proceso de decantación de lodos en las celdas de decantación del sistema, se utilizarán los valores obtenidos de los sólidos totales de las muestras tomadas en la entrada y salida de una de las celdas de decantación (los resultados se muestran en la tabla X). Debe tenerse en cuenta que el agua que ingresa a las celdas de decantación ya ha sido neutralizada (pH = 7), para que además de prevenir la corrosión en las tuberías y equipos, ayude a la precipitación de metales pesados en el proceso de floculación y decantación de las cenizas.

Tabla XIII. Resultados de las muestras de entrada y salida de las celdas

| Muestra de 1 litro | Temperatura (°C) | PH | Sólidos totales (%) |
|-----------------------|------------------|-----|---------------------|
| Entrada de las celdas | 36 | 6,8 | 7,5 |
| Salida de las celdas | 33 | 6,9 | 0,08 |

Fuente: Laboratorio de Cogeneración, Ingenio Madre Tierra. *Resultado de muestras.*

Calculando la eficiencia de remoción de las cenizas en las celdas o tolvas de decantación:

$$E = \frac{7,5 - 0,08}{7,5} * 100$$

$$E = 98,93 \%$$

La eficiencia de remoción de cenizas en las celdas de decantaciones de aproximadamente 98,93 %. Cabe decir que es una excelente eficiencia, donde se cumple con el objetivo esperado..

3.11.2. Eficiencia de remoción de agua contenida en las cenizas extraídas del fondo de las tolvas decantadoras

Para determinar esta eficiencia se utilizaron los valores de humedad analizados en las muestras, tomadas en la entrada del filtro rotativo y el promedio en la salida del filtro rotativo y de la prensa de deshidratación, ya que estas dos máquinas realizan el proceso de filtración y secado respectivamente. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XIV. **Resultados promedio de las muestras de entrada y salida del proceso de filtración**

| Muestra de 1 litro | Temperatura (°C) | PH | Humedad (%) |
|--|------------------|----|-------------|
| En la entrada del filtro rotativo | 30 | 7 | 88 |
| En la salida del filtro rotativo y la prensa de deshidratación | 27 | 7 | 43 |

Fuente: Laboratorio de Cogeneración, Ingenio Madre Tierra. *Resultados promedio de las muestras.*

Calculando la eficiencia de remoción de agua de los lodos extraídos del fondo de las tolvas de decantación:

$$E = \frac{88 - 43}{88} * 100$$

$$E = \mathbf{51,14 \%}$$

La eficiencia de remoción de agua de los lodos en el proceso de filtración es de aproximadamente 51,14 %. En este caso se obtuvo una eficiencia muy baja, por lo cual se propone aumentarle el número de tamiz (mesh) del filtro rotativo para aumentar dicha eficiencia.

4. FASE DE DOCENCIA

En esta fase, en colaboración con el supervisor de Salud y Seguridad Ocupacional (SSO) del ingenio, se realizó una capacitación al personal de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua con cenizas, acerca de la seguridad industrial, dándoles a conocer los diferentes riesgos que existen en tal área de dicha planta, así como también los actos inseguros que se observaron en el personal.

4.1. Equipo de protección personal

El equipo de protección personal está diseñado para proteger a los empleados en el lugar de trabajo de lesiones o enfermedades serias que puedan resultar del contacto con peligros mecánicos, químicos, físicos y otros. Además, todo el personal debe portar casco, zapatos industriales, tapones auditivos y gafas protectoras, y utilizar otra variedad de dispositivos como guantes, overol, mascarilla y otros; esto depende del área donde circula o la actividad que realiza.

4.2. Panorama de riesgos

A continuación se mencionan los diferentes tipos de riesgos observados en el área de la planta de tratamiento de agua con cenizas durante la operación y mantenimiento de la misma, así como también se dan a conocer las medidas de control que existen y, si no, se darán propuestas para comenzar a ejercer tal control:

4.2.1. Panorama de riesgos físicos

Los riesgos de este tipo son muy comunes en todas las actividades que se realizan constantemente en el lugar de trabajo. Se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla XV. **Panorama de riesgos físicos**

| PELIGRO | DAÑO/CONSECUENCIA | MEDIDAS DE CONTROL EXISTENTES | MEDIDAS DE CONTROL PROPUESTAS |
|--|---|-------------------------------|---|
| Ruido por funcionamiento de rotativo y prensa de deshidratación | Perdida auditiva | Tapones auditivos | Colocación de señales de uso obligatorio de tapones auditivos; capacitación constante sobre el uso adecuado del equipo de protección personal |
| Vibraciones por funcionamiento de filtro rotativo y prensa de deshidratación | Tensión muscular, compresión de los tejidos | Ninguna | Instalación de soportes antivibratorios en las máquinas |

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Panorama de riesgos químicos

Estos son agentes químicos muy variados, y han adquirido gran peligrosidad debido a combinaciones de sustancias inorgánicas utilizadas en actividades del trabajo. Se mencionan en la tabla de la página siguiente:

Tabla XVI. **Panorama de riesgos químicos**

| PELIGRO | DAÑO/CONSECUENCIA | MEDIDAS DE CONTROL EXISTENTES | MEDIDAS DE CONTROL PROPUESTAS |
|--|---|--|---|
| Material particulado (bagazo y ceniza) y vapores | Irritación de ojos y/o garganta. | Lentes antiartículas y mascarillas N-95 | Señalización de uso obligatorio de lentes y mascarilla; instalación de lava ojos; capacitación contante sobre el uso adecuado del equipo de protección personal |
| Manipulación de floculante y cal | Irritación y/o quemaduras por contacto o inhalación; ceguera temporal o permanente. | Lentes de policarbonato y nitrilo, mascarilla de carbón activado | Señalización de uso obligatorio de guantes, mascarillas y lentes; instalación de ducha de emergencia y estación de lava ojos; capacitación de manejo y uso adecuado de químicos irritantes. |

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. **Panorama de riesgos biológicos**

Estos riesgos se encuentran en lugares o sustancias que contienen microorganismos u otros seres vivos. Se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla XVII. **Panorama de riesgos biológicos**

| PELIGRO | DAÑO/CONSECUENCIA | MEDIDAS DE CONTROL EXISTENTES | MEDIDAS DE CONTROL PROPUESTAS |
|---|--|-------------------------------|---|
| Mordedura de serpientes, insectos, etc. | Envenenamiento por mordedura de serpientes, araña etc. | Ninguna | Plan de control de reptiles, insectos y aracnidos; utilización de botas altas con punta de acero y botiquin de primeros auxilios. |

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Panorama de riesgos mecánicos

Estos riesgos son factores físicos que pueden dar lugar a una lesión por acción mecánica de elementos de máquinas, herramientas, piezas y materiales de trabajo. Se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla XVIII. **Panorama de riesgos mecánicos**

| PELIGRO | DAÑO/CONSECUENCIA | MEDIDAS DE CONTROL EXISTENTES | MEDIDAS DE CONTROL PROPUESTAS |
|--|--|-------------------------------------|---|
| Caidas a nivel por derramamiento de líquidos | Politraumatismo, contusiones y quebraduras | Senalización con cintas de peligro. | Limpieza periodica del área (retirar objetos que impidan la libre locomoción) |
| Caida en alturas | Politraumatismo, contusiones, fracturas, quebraduras y fatalidad | Arnes de seguridad | Capacitacion y concientización de la importancia de la utilización de arnes de seguridad y línea de vida. |
| Choques, volcamientos y atropellamientos en área de carga de cenizas | Traumatismo, muerte. | Ninguna | Señalización, barrera de protección, uso de chaleco reflectivo o camisa con cinta reflectiva. |

Fuente: elaboración propia.

Es importante acudir al área de seguridad industrial en el momento de no estar seguros de una situación en el trabajo.

4.3. Actos inseguros

Los actos inseguros detectados en los trabajadores durante el mantenimiento, puesta en marcha y operación del sistema son:

- Uso de herramientas y equipos sin antes leer el manual de instrucciones

- Permanencia en lugares inseguros
- Dejar objetos tirados u olvidados obstaculizando el lugar
- No utilizar tapones auditivos

4.4. Normas y medidas de seguridad

Las normas generales de seguridad en la planta son un conjunto de distintas medidas planteadas para velar por la seguridad de todos los colaboradores. El ingrediente principal debe ser la actitud, responsabilidad y concientización de todos (operadores, técnicos, supervisores e ingenieros). Algunas normas generales que se deben mantener en el área industrial del ingenio son:

- Usar adecuadamente el equipo de protección personal.
- Usar pantalón de lona.
- Usar camisa con franjas reflectivas o chalecos reflectivos.
- Usar los pasos peatonales establecidos.
- Usar zapato con punta de acero (calzado industrial).
- Usar casco de seguridad.
- Usar tapones auditivos.
- Respetar las cintas, tanto amarillas como rojas, que indican precaución y paso restringido.

Normas generales que se deben mantener en el lugar de trabajo:

- Utilizar adecuadamente el equipo de protección personal.
- Mantener el orden y limpieza.
- Identificar y respetar las señales de seguridad.
- No sobrecargar las bases de tomacorrientes.

- Apagar todos los aparatos eléctricos y maquinaria.
- No fumar.
- No consumir alimentos dentro del lugar de trabajo.
- Usar arnés de seguridad para trabajos en alturas.
- No obstruir extinguidores, ni tampoco mangueras contra incendios.
- Señalizar con cinta o conos de tránsito si se va a realizar trabajos de corte, soldadura u otro tipo de trabajo que lo requiera.
- Utilizar los pulsadores de paradas de emergencia sin son necesarios.
- No viajar en los estribos de ningún tipo de vehículo.
- Reportar a su jefe superior cualquier condición o acción insegura.
- No utilizar audífonos celulares u otro tipo de distracción en horas de trabajo.

En caso de emergencia:

- Mantener la calma, ponerse a salvo y dar aviso a los demás.
- Informar al supervisor inmediato o al supervisor de SSO.
- Si la emergencia es un accidente, comunicarlo a unidad médica.
- El personal entrenado en primeros auxilios debe brindar apoyo de inmediato a la persona afectada.
- Al presentarse el personal de SSO ellos serán los encargados de dar seguimiento y tomar decisiones sobre la misma.
- Si la emergencia es por un conato de incendio y la persona sabe utilizar un extinguidor debe tomar la decisión de usarlo, pero si hay riesgo contra la vida no debe arriesgarse y avisar inmediatamente al supervisor y que las brigadas contraincendios actúen sofocando el fuego.
- Evacuar el área por la ruta señalizada y tratar de apagar los equipos eléctricos.

- No correr, simplemente caminar rápido, ya que al correr pueden provocarse caídas.
- Si se sale del lugar afectado, por ninguna razón volver a entrar.
- Colaborar en la medida de lo posible con los expertos.
- Posterior a la emergencia, el jefe o supervisor deberá brindar información a SSO para su evaluación e informe. Así se determinarán las causas y se elaborarán propuestas para evitar futuros incidentes.

4.5. Sanciones

En el momento que algún colaborador incumpla los puntos descritos con anterioridad, los ingenieros, supervisores y el equipo de monitores de seguridad industrial deberán tomar las medidas disciplinarias correspondientes, como a continuación se menciona:

- Llamada de atención verbal y escrita; se abre un expediente a través del departamento de seguridad industrial con copia a jefes inmediatos del colaborador afectado.
- Segunda llamada de atención escrita; se realiza copia al expediente del afectado y suspensión de dos días sin goce de salario.
- Despido por incumplir las normas de la empresa (y se tomará como rebeldía).

CONCLUSIONES

1. La planta fue diseñada para tratar, por proceso de floculación, el agua que proviene de los lavadores de gases de combustión de las calderas # 5 y # 8, con el objetivo principal de reutilizarla para reducir su consumo.
2. El costo del montaje de la planta fue reducido al máximo, ya que se utilizaron algunos equipos reutilizables y materiales reciclados como láminas de acero al carbono ASTM A36, resultando un costo total aproximado de Q. 4 244 850,00.
3. La energía eléctrica que consumen los equipos incurre en casi el 50 % del costo total de operación del sistema. El costo total es de aproximadamente Q. 1868 914,00.
4. De acuerdo a las dosificaciones de cal y floculante se pudo observar que la eficiencia de decantación de las cenizas es del 98,93 % llegando a cumplir con el objetivo deseado, y de acuerdo a la eficiencia de extracción de agua de las cenizas es del 51,14 % obteniendo una eficiencia baja, por lo cual quedó en propuesta el cambio de número de mesh del filtro rotativo y así aumentar dicha eficiencia.
5. Con un buen mantenimiento preventivo y predictivo se asegura un buen funcionamiento y un mayor tiempo de operación de los equipos, evitando así paros inesperados por mantenimientos correctivos, lo cual repercutiría en costos extra de operación.

6. La identificación de los diferentes tipos de riesgos en el área del sistema de tratamiento de cenizas ayudará a tomar acciones para aumentar el nivel de seguridad del personal que transite por dicha área.

RECOMENDACIONES

1. Con este tipo de montaje se utilizan los sistemas de lavadores de gases de combustión de calderas (*scrubber*), sin tomar agua de los afluentes naturales para limpiar los gases.
2. Las cenizas con poca humedad extraídas de la planta se pueden aprovechar en el campo para utilizarlas como *compost* (abono orgánico).
3. Para evitar la degradación del floculante y la corrosión del equipo, es recomendable no utilizar contenedores ni equipo de hierro, cobre o aluminio; además, no deberá exponerse a la humedad, para mantener su integridad, ya que es un material higroscópico.
4. Antes de arrancar los motores eléctricos hay que verificarles el aislamiento con un megóhmetro, para evitar un cortocircuito dentro del estator del equipo, debido a un bajo aislamiento causado comúnmente por alta humedad.
5. Cumplir con el uso de equipo de protección personal como lentes, mascarilla, etc., debido a las impurezas y volátiles que circulan a través de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acoplamientos Falk Steelflex, instalación y mantenimiento. [en línea].<http://www.rexnord.com>. [Consulta: abril de 2015].
2. American Welding Society. *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, A5.1/A5.1M:2012*. American National Standard. 4 p.
3. ATS Asesoría - transporte – servicio. *Sistema para tratamiento de agua de ceniza de lavado de gases de calderas*. [en línea]. <<http://www.atsguate.com/productos.pdf>>. [Consulta: 10 de julio de 2015].
4. *Cultivo de caña*. <http://www.lavozdelsandinismo.com/nicaragua/2013-12-17/elevado-el-cultivo-de-cana-en-nicaragua/>. Consulta: marzo de 2015.
5. Engenovo. *Tratamiento de agua de ceniza*. [en línea]. <http://www.engenovo.com.br/es/produtos_servicos/acucar_alcool/taf.php> [Consulta: 03 de mayo de 2015].
6. *Equipo SMAW*. [en línea]. <http://www.teminsa.com/blog/wp-content/uploads/2014/12/Electrodo-Equipo-de-Soldadura.jpg>. [Consulta: marzo de 2015].

7. FLORES, Carlos. *Soldadura al arco eléctrico (SMAW)*. [en línea]. http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_08_MEC01.pdf. [Consulta: 15 de enero de 2015].
8. *Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad*. [en línea]. <http://www.ifc.org/>. [Consulta: febrero de 2015].
9. HERNÁNDEZ RAMÍREZ, Erick Fernando. *Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003, 133 p.
10. Jansen Combustion and Boiler Technologies, Inc. [en línea]. <http://jansenboiler.com/>. [Consulta: 17 de enero de 2015].
11. KEMIRA. *Ficha de datos de seguridad de floculante Superfloc C-492HMMW*. 158 p.
12. POPE J., Edward. *Soluciones prácticas para el ingeniero mecánico*. México, McGraw-Hill, Interamericana, 2000. 416 p.
13. *Precipitador electrostático*. [en línea]. http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/imagenes/fig45.gif. [Consulta: marzo de 2015].
14. *Precipitador electrostático*. <http://www.haijian-machine.com/9-1-electrostatic-precipitator/166556>. [Consulta: marzo de 2015].

15. *Rejilla de acoplamiento.* [en línea]. <http://3.bp.blogspot.com/-bG4JTgTRX84/VIFQhPRPobl/AAAAAAAAAArc/l1SvD-9x5dg/s1600/grid-coupling-grid-element.jpg>. Consulta: abril de 2015.
16. *Sección de bombas volumétrica.* [en línea]. http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/31551-8975030.jpg. [Consulta: abril de 2015].
17. *Venturi scrubber.* [en línea]. https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_scrubber. [Consulta: 25 de octubre de 2014].

