

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN  
CLARIFICADOR DE AGUA, ORIUNDA DE LAVADO DE GASES  
EN CALDERAS DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

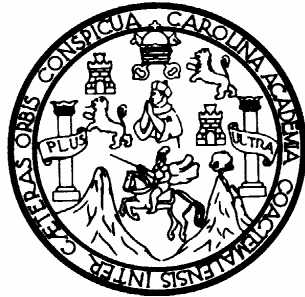
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUIS ALBERTO LEZANA CHAJÓN**  
ASESORADO POR EL ING. ENRIQUE A. VELÁSQUEZ ARREAGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
<b>VOCAL I</b>	Inga. Glenda Patricia García Soria
<b>VOCAL II</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV</b>	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V</b>	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIA</b>	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Francisco Arrivillaga Ramazini
<b>SECRETARIA</b>	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta**  
Director Escuela Mecánica  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Presente

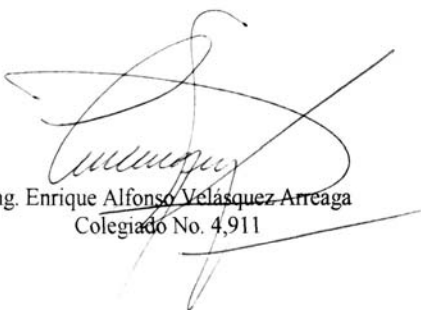
Director

Por medio de la presente hago de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante **LUIS ALBERTO LEZANA CHAJON**, con número de carné 1999-10788 procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **ANÁLISIS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN CLARIFICADOR DE AGUA, ORIUNDA DE LAVADO DE GASES EN CALDERAS DE INGENIO LA UNION S.A.**

Habiendo encontrado satisfactorio el contenido de dicho informe, le doy por aprobado solicitándole a la vez se le dé el siguiente trámite que le corresponda.

Sin otro particular, me suscribo de usted

Atentamente



Ing. Enrique Alfonso Velásquez Arreaga  
Colegiado No. 4,911

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS  
Tel. 24423509

"Todo por ti Carolingia Mía"  
Dr. Carlos Martínez Durán  
2006: Centenario de su Nacimiento

Guatemala, 05 de septiembre de 2006  
Ref. EPS. C. 489.09.06

Ing. Ángel Roberto Sic García  
Coordinadora Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Sic García.

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica, **LUIS ALBERTO LEZANA CHAJÓN**, procedí a revisar el informe final de la práctica de EPS, cuyo título es "ANÁLISIS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN CLARIFICADOR DE AGUA, ORIUNDA DE LAVADO DE GASES EN CALDERAS DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.".

Cabe mencionar que las soluciones planteadas en este trabajo, constituyen un valioso aporte de nuestra Universidad a uno de los muchos problemas que padece el país.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Sé y Enseñad a Todos"



Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda  
Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica

EESZ/jm

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS  
Tel. 24423509

"Todo por la Carolingia Mia"  
Dr. Carlos Martínez Durán  
2006: Centenario de su Nacimiento

Guatemala, 05 de septiembre de 2006  
Ref. EPS. C. 489.09.06

Ing. Fredy Monroy  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Monroy.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado "ANÁLISIS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN CLARIFICADOR DE AGUA, ORIUNDA DE LAVADO DE GASES EN CALDERAS DE INGENIO LA UNIÓN, S.A." que fue desarrollado por el estudiante universitario **LUIS ALBERTO LEZANA CHAJÓN**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Enrique Velásquez Arreaga y supervisado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo, en mi calidad de coordinador apruebo su contenido, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Dá y Enseñad a Todos"



Ing. Ángel Roberto Sic García  
Coordinador Unidad de EPS

ARSG/jm

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**ANÁLISIS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN  
CLARIFICADOR DE AGUA, ORIUNDA DE LAVADO DE GASES  
EN CALDERAS DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.,**

tema que me fuera asignado por la coordinación de la Carrera de Ingeniería Mecánica, el 03 de Noviembre de 2005.



**Luis Alberto Lezana Chajón**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por la fortaleza y sabiduría que me brinda para caminar hacia mis sueños.
- Mis padres** Hugo Enrique Lezana Najarro.  
Gloria Elizabeth Chajón de Lezana.  
Por forjar mi camino y fortalecer mi vida con sus consejos, para lograr mis sueños.
- Mis Abuelas** Amelia Najarro.  
Candelaria García.  
Por sus consejos y apoyo moral.
- Mis hermanos** Estuardo Enrique Lezana Chajón.  
Maria José Lezana Chajón.  
Porque a través de mi vida han caminado conmigo siempre.
- Mis amigos** Por apoyarme y darme los consejos necesarios para lograr una meta importante en mi vida.





# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>VII</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XIII</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XVII</b>
<b>1. FASE DE INVESTIGACIÓN</b>	
1.1 Monografía de Ingenio La Unión, S.A.	1
1.1.1 Monografía geográfica	1
1.1.2 Monografía socio-económica	2
1.2 Descripción de la actividad industrial de la empresa	2
1.2.1 Producción de azúcar	3
1.2.2 Generación de energía eléctrica	5
1.3 Generalidades sobre generadores de vapor	6
1.3.1 Tipos de calderas de vapor	10
1.3.1.1 Pirotubulares	10
1.3.1.2 Acuotubulares	15
1.3.1.2.1 Por su tipo de combustible	20
1.3.1.2.1.1 Sólido	20
1.3.1.2.1.1.1 Bagazo	20
1.3.1.2.1.1.2 Carbón	24
1.3.1.2.1.2 Líquido	27
1.3.1.2.1.2.1 Derivados del petróleo	27
1.3.1.2.1.3 Gaseoso	30

1.3.1.2.1.3.1	De recuperación	30
1.3.1.2.1.3.2	De gas	31
1.3.2	Calderas de vapor y sus accesorios(acutubulares)	31
1.3.2.1	Horno u (Hogar)	31
1.3.2.2	Ventiladores	33
1.3.2.3	Sopladores de hollín	34
1.3.2.4	Separador de contaminantes	35
1.4	Generalidades sobre contaminantes en calderas de bagazo	35
1.4.1	Tipos de contaminantes	36
1.4.1.1	Contaminantes por sedimentación	36
1.4.1.1.1	Lodos en purga continua	37
1.4.1.1.2	Lodos en purga de fondo	37
1.4.1.2	Contaminantes sólidos en la chimenea (voladores)	39
1.4.1.3	Contaminantes sólidos en la parrilla (en cenizas)	41
1.4.2	Tipos de separadores de contaminantes	41
1.4.2.1	Tipo seco	41
1.4.2.2	Tipo húmedo	47
1.4.3	Tratamiento de contaminantes	49
1.4.3.1	Con aire	49
1.4.3.2	Con agua	50
<b>2.</b>	<b>FASE TÉCNICO PROFESIONAL</b>	
2.1	Separadores de contaminantes tipo húmedo	53
2.1.1	Descripción del sistema en el área de calderas de Ingenio La Unión	53
2.1.2	Tratamiento del agua	53
2.1.3	Tratamiento de contaminantes	62
2.1.3.1	Su formación	62
2.1.3.2	Su remoción	63

2.2	Criterios de ingeniería en el diseño del clarificador de agua.	64
2.3	Descripción de los equipos utilizados en el sistema de clarificación de agua	65
2.3.1	Conductores	66
2.3.2	Filtros	68
2.3.3	Tanques	69
2.3.4	Bombas	70
2.3.5	Celdas de decantación	73
2.3.6	Tanques de floculante	74
2.3.7	Compresor de aire p/agitar	76
2.3.8	Válvulas	77
2.3.9	Canal de lodos	78
2.3.10	Tolva de desechos	80
2.4	Operación del clarificador	81
2.4.1	Procedimientos de arranque	83
2.4.1.1	Pruebas	83
2.4.1.1.1	Preparación para el arranque	85
2.4.1.1.2	Arranque	86
2.4.1.1.3	Parada	87
2.4.1.2	Llenado de agua de tanques y celdas de decantación	88
2.4.1.3	Regulación de flujo de agua clarificada	89
2.4.1.4	Regulación de flujo de lodos	90
2.4.1.5	Sistema de filtrado	93
2.4.1.6	Remoción de lodos	93
2.4.1.7	Make-up o agua de reposición	94
2.5	Sistema de dosificación y preparación de floculante	95
2.5.1	Cálculo de floculante	95
2.5.2	Tipo de floculante	96
2.5.3	Tanques de preparación	97

2.5.3.1	Preparación y adición en tanques de floculante	97
2.5.4	Bombas dosificadoras	99
2.5.5	Tipo de agitador	100
2.5.6	Puntos de aplicación	100
2.6	Operación de la celda de decantación	102
2.6.1	Regulación de entrada de agua a celdas de decantación	102
2.6.2	Formación de flóculos	102
2.6.3	Manejo de lodos	103
2.6.4	Análisis de agua en la salida de las celdas de decantación	106
2.7	Implementación del programa de mantenimiento a equipos en el proceso de clarificado del agua	108
2.7.1	Conceptos de mantenimiento	108
2.7.2	Tipos de mantenimiento	110
2.7.2.1	Mantenimiento de averías	110
2.7.2.2	Mantenimiento preventivo	110
2.7.2.3	Mantenimiento predictivo	111
2.7.2.4	Estructura del programa de mantenimiento	111
2.7.3	Mantenimiento en época de zafra	118
2.7.3.1	Inspección por turnos	118
2.7.3.2	Control de repuestos básicos y crítico	118
2.7.4	Mantenimiento en épocas de no zafra	119
2.7.4.1	Inspección	119
2.7.4.2	Sistema de control de la reparación	120
2.7.4.3	Constancia de calidad de reparación	120
	<b>CONCLUSIONES</b>	123
	<b>RECOMENDACIONES</b>	125
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	127
	<b>ANEXOS</b>	129

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Partes generales de una caldera pirotubular	14
2	Diseño general de una caldera pirotubular	14
3	Diseño general de una caldera acuotubular que quema bagazo	19
4	Separador de contaminante tipo seco	45
5	Operación de un precipitador electrostático	46
6	Separador de contaminante tipo húmedo	49
7	Absorción de partículas de material	52
8	Estructura de la capa doble	55
9	Formación de flóculos	63
10	Diagrama de flujo y equipos utilizados en el proceso de clarificación de agua.	65
11	Conductores	67
12	Transmisión del conductor	67
13	Filtros de tela tipo <i>Vee - Wire</i>	68
14	Bomba semi Vortex	70
15	Bomba centrífuga	71
16	Bomba de desplazamiento positivo	71
17	Celda de decantación	74
18	Tanques de floculante	75
19	Compresor de aire	76
20	Válvulas de mariposa	78
21	Canal de lodos	79
22	Tolva de desechos	80

23	Diagrama esquemático del proceso de clarificación de agua de ceniza de lavado de gases en calderas	82
24	Altura y nivel de operación del decantador	89
25	Válvula de drenaje de lodos de las celdas de decantación	92
26	Dosificación del polímetro floculante	99
27	Punto de aplicación del polímero	101
28	Vista superior del punto de aplicación de floculante en la celda de decantación	101
29	Simulación en vidrio de las varias etapas de decantación del agua de ceniza en el interior de las celdas de decantación	103
30	Diagrama de la transmisión de los conductores de tablillas	104
31	Salida de agua tratada por los vertederos de las celdas de decantación	107
32	Diagrama del proceso de implementación del programa de mantenimiento.	112
33	Diagrama del proceso de seguimiento del programa de mantenimiento	113
34	Diagrama de las áreas de acción del programa de Mantenimiento	115
35	Simbología del diagrama de flujo	133

## TABLAS

<b>I</b>	Composición química del bagazo.	21
<b>II</b>	Propiedades del <i>Fuel Oil 6</i> (Bunker C)	29
<b>III</b>	Tipos de coagulante	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

Mw	Megawatts
Kw/t.	Kilowatts sobre toneladas.
Psi	Símbolo de libras por pulgada cuadrada
°C	Símbolo de grados Celsius
°F	Símbolo de grados Fahrenheit
RPM	Revoluciones por minuto
GPM	Galones por minuto
H.P	Caballos de fuerza
Psi	Símbolo de libras por pulgada cuadrada
kg	Kilogramo
mm	Milímetros
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
t	Toneladas
Kw	Kilowatts
MJ/kg	Mega joul sobre kilogramo
KJ/kg	Kilo joul sobre kilogramo
Kcal/Kg	Kilocalorías sobre kilogramo
TCE	Toneladas de calor específico
Ton/hr	Toneladas de vapor - hora
Lb/hr	Libras de vapor - hora
pH	Símbolo utilizado en química para acidez de un fluido
µm	Micrómetro (medida de longitud)
Kg/cm <sup>2</sup>	Símbolo de kilogramo sobre centímetro cuadrado
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
HCL	Cloruro de hidrógeno
BTU	(British Thermal Unit)





## GLOSARIO

<b>Zafra</b>	Tiempo de cosecha de la caña de azúcar, además del procesamiento de la misma, para la producción de azúcar en los ingenios azucareros.
<b>Bagazo</b>	Material sólido y fibroso, residuo de la molienda de la caña de azúcar, el cual suministra energía.
<b>Monografía</b>	Descripción de un lugar en particular.
<b>Domo</b>	Parte de la caldera de forma cilíndrica que recibe agua de alimentación.
<b>Parrilla</b>	Elemento de la caldera sobre el cual se depositan las cenizas de la combustión.
<b>Tándem</b>	Conjunto de molinos, cada uno con cuatro masas metálicas que mediante presión, extrae el jugo de la caña.
<b>Aspersión</b>	Asperjar, rociar, regar.
<b>Scrubbers</b>	Lavador de gases.
<b>Materia particulada</b>	Son partículas de ceniza, arena y bagazo no quemado de la combustión.

<b>Reductores</b>	Conjunto de engranes rectos o helicoidales, acoplados de manera que reduzcan la velocidad en la entrada del sistema.
<b>Azúcar crudo</b>	Producto sólido cristalizado obtenido de la caña de azúcar, constituido esencialmente por cristales de sacarosa, cubiertos de una película de su licor madre.
<b>Corrosión</b>	Reacción química de un material metálico con su entorno, lo cual conduce a una variación de sus propiedades.
<b>Agua de imbibición</b>	Agua caliente que se agrega al último molino de un tándem cañero para que su efecto sea de lixiviación.
<b>Lixiviación</b>	Es una operación para separar los constituyentes solubles de un sólido inerte con un solvente.
<b>Purga</b>	Limpiar, evacuar sólidos no deseados, en suspensión o sedimentados, de una caldera.
<b>Remoción</b>	Cambiar de sitio una cosa. Quitar, remover.
<b>Volátil</b>	Dicese de las cosas que se mueven ligeramente y andan por el aire. En la química se usa para definir algo que puede convertirse en vapor.
<b>Adsorción</b>	Se refiere al proceso donde las moléculas de compuestos orgánicos volátiles, son removidos de la corriente gaseosa, al transferirse a la superficie sólida del adsorbente.

<b>Absorción</b>	Son métodos de transferencia de masa, desde la corriente de aire que contiene la carga de compuestos orgánicos volátiles, hasta un líquido absorbente, impulsados por un gradiente de concentración.
<b>Floculación</b>	Proceso de aglomeración de las partículas coaguladas para formar flóculos sedimentables, por lo general, de naturaleza gelatinosa.
<b>Coloide</b>	Materia de muy fino tamaño de partícula, por lo general, en el intervalo de $10^{-5}$ a $10^{-7}$ cm. de diámetro.
<b>Floculante</b>	Poliectrolitos orgánicos solubles en agua que se usan solos o en combinación con coagulantes inorgánicos, como sales de aluminio o de hierro, con el objeto de aglutinar los sólidos presentes en el agua.
<b>Hidrófilos</b>	Estas sustancias se disuelven en agua, ya que se forman enlaces de hidrógeno entre el grupo polar y las moléculas de agua, pero no son solubles cuando la parte hidrocarbonada es larga, ya que ésta no es atraída por las moléculas de agua.
<b>Hidrófobas</b>	En las dispersiones estables de coloides hidrófilos, por ejemplo jabón y agua, existe un perfecto equilibrio entre moléculas iguales y las fuerzas atractivas entre moléculas distintas. Cuando las últimas son mayores que las primeras, se forma una disolución verdadera. Sin embargo, cuando las fuerzas de atracción entre moléculas iguales es mayor que entre moléculas, no se forma la dispersión, a no ser, que se añada una sustancia estabilizadora.



## RESUMEN

Para atender a las reglamentaciones ambientales de hoy, los gases emitidos por calderas que utilizan bagazo de caña y otros tipos de combustibles, deben, obligatoriamente, pasar por una etapa de lavado eficiente para remoción de las partículas sólidas que son arrastradas por los gases de escape. La opción de lavado de gases, se hace vía húmeda, aunque adecuada y de bajo costo, tiene la facilidad de contar con un proceso eficiente de remoción de la ceniza del agua.

En el presente trabajo, se desarrolló una nueva tecnología eficiente y de simple concepción, para el análisis de operación y funcionamiento del clarificador de agua de ceniza oriunda del lavado de gases y ceniceros de las calderas. El sistema opera en circuito cerrado, posibilitando a recuperar y recircular toda el agua para el proceso, y así, poder separar los sólidos de forma compacta y apropiada.

Se han identificado parámetros necesarios y condiciones mínimas que hay que tomar en cuenta, para la clarificación de agua, además de tomar en consideración los equipos necesarios, para brindarle al sistema la seguridad requerida para su buen funcionamiento. Estableciendo de forma alterna como una herramienta de control, un programa de mantenimiento que cumpla con las exigencias mínimas establecidas por las normas de la empresa, buscando en todo momento documentar, controlar y verificar la calidad de los procedimientos de mantenimiento, que se realicen en los equipos del clarificador de agua de ceniza, en el proceso de limpieza de gases de calderas.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Se pretende que el presente trabajo sea un material que permita evaluar y determinar la operación y eficiencia de un clarificador de agua de ceniza oriunda de lavado de gases de calderas en un ingenio azucarero que utiliza bagazo como combustible, logrando recuperar toda el agua utilizada en la limpieza de gases de calderas, para luego aprovecharla para el mismo proceso, logrando obtener una reducción de contaminación al medio ambiente.

### **Específicos**

1. Dar a conocer las mejoras en la obtención de agua limpia, libre de sólidos en suspensión, adecuada para ser reciclada para las boquillas aspersoras de los scrubbers.
2. Atender a la calidad de agua requerida por los sistemas de lavado de gases existentes en el mercado.
3. Proporcionar a través de esta investigación, una orientación a cualquier trabajador que tenga relación con el proceso productivo de la planta.
4. Enumerar las acciones que han de tomar los operarios del clarificador de agua de ceniza de calderas, durante el arranque y parada del clarificador.
5. Dar lineamientos para el cuidado de los equipos utilizados en la clarificación de agua de ceniza de calderas.





## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la agroindustria azucarera juega un papel muy importante en el crecimiento de la economía del país, la que se refiere a la producción del azúcar por medio del aprovechamiento de los recursos naturales de zonas de caña de azúcar; los ingenios azucareros han logrado implementar un programa de trabajo que beneficia, no sólo al país, sino a la comunidad de la zona enfocando sus esfuerzos a programas sociales, educativos y del medio ambiente, dando a ésta, estabilidad en todos sus niveles, además de darle la capacidad de competir en los mercados internacionales.

El presente trabajo, se ha enfocado hacia la ingeniería mecánica en el campo de calderas, implementando un clarificador de agua de ceniza oriunda del lavado de gases de combustión de las calderas, el cual es un equipo utilizado para clarificación de agua pudiendo obtener una recirculación del agua limpia y así proteger el medio ambiente que es uno de los programas establecidos por la empresa, así como también cuáles son los equipos involucrados en la clarificación de agua en esta industria, beneficios que se obtienen de los mismos, además de conocer los parámetros de selección necesarios para obtener el más alto rendimiento, y el mayor porcentaje de eficiencia de los equipos utilizados, ya que es uno de los puntos más importantes en la planificación del sistema del clarificado de agua de ceniza de calderas.

El trabajo pretende dar, además, una guía establecida de un programa de mantenimiento aplicado al sistema del clarificador, buscando mantener la vida útil de los mismos, permitiendo controlar, analizar y corregir cualquier anomalía en el sistema, documentando el tiempo las características de operación de los equipos para poder así tener una retroalimentación, que permita en el futuro predecir sus comportamientos de trabajo y funcionamiento del clarificador para una mejor optimización.



# **1. FASE DE INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Monografía de Ingenio La Unión, S.A.**

### **1.1.1 Monografía geográfica**

En el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa del departamento de Escuintla, se encuentran ubicadas entre otras industrias, varias empresas dedicadas a la producción de azúcar, entre las cuales está Ingenio La Unión, S.A. el cual está ubicada en finca Belén.

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

El área ocupada por las instalaciones del Ingenio es de 4.897405 manzanas. Las coordenadas geográficas de las instalaciones del Ingenio son: Latitud Norte 14 grados 16 minutos 11 segundos. Longitud Oeste 91 grados 05 minutos 05 segundos y una altitud de 280 mts, sobre el nivel de mar.

El clima de la región es cálido, registrándose temperaturas de 14.2 ° C (Min.), y 36.7 ° C (Máx.). Se observa una precipitación pluvial abundante durante los meses de mayo a octubre, mientras que en los meses de noviembre a abril se considera una época seca, la precipitación pluvial promedio es de 3,085.5 mm, aunque hay lluvias esporádicas; la humedad se encuentra en el 80%, pero se hace notar que es una región

donde llueve mucho, principalmente en época de invierno y espontáneamente en épocas de verano.

### **1.1.2 Monografía socio-económica**

En la época de cosecha de caña y producción de azúcar llamada zafra, existe alta demanda de personal en los ingenios azucareros, más que todo para el corte de la caña; para realizar este trabajo se contrata a personas que vienen procedentes de distintos lugares del país, lo que hace a Santa Lucia Cotzumalguapa una ciudad muy próspera y comercial. El tiempo de siembra, crecimiento de caña y mantenimiento de los diferentes equipos es llamada reparación, y se hace principalmente con el personal en su mayoría habitantes de la ciudad de Santa Lucia Cotzumalguapa.

Además del área industrial, en la finca Belén se encuentran oficinas administrativas, viviendas para el personal técnico, instalaciones sociales que están formadas por un club con salón de usos múltiples, piscina, cancha de tenis, una cancha de fútbol y una cancha de basket ball.

## **1.2 Descripción de la actividad industrial de la empresa**

Ingenio La Unión S.A. es una empresa dedicada a la transformación de materia vegetal en productos de consumo humano, para esto utiliza como materia prima la caña de azúcar, empezando desde su cultivo y cosecha pasando por un proceso de transformación con la extracción de su jugo hasta su cristalización. El proceso de fabricación está diseñado para utilizar de una manera óptima todos los recursos disponibles, es por ello que se utiliza los residuos de la caña molida, el bagazo como

combustible en las calderas para la obtención de vapor el cual es utilizado principalmente para la generación de energía eléctrica por medio de turbogeneradores, ésta energía hace autosuficiente a la fábrica para el funcionamiento de los equipos del proceso y el excedente para su venta a la red Nacional.

### **1.2.1 Producción de azúcar**

Ingenio La unión S.A. cosecho en la zafra 2,005-2,006 una producción de azúcar de 3,844,143.89 qq. De esta producción la empresa fabrica diferentes tipos de azúcar, con su respectivo envasado: Azúcar crudo mundial (granel), Azúcar blanco estándar con vitamina y sin vitamina (50 Kg), Azúcar crudo especial (jumbo, 50 Kg), Azúcar blanco cristal o superior (Jumbo, 50 Kg). El jumbo tiene una capacidad de envasado de (22 tonelada promedio).

En los años actuales, la producción de azúcar de Guatemala ha llegado a ser más importante, debido al hecho que en cosechas recientes ha alcanzado niveles de registro de la producción, y ha ocupado el tercer lugar como exportador más grande de América latina y del mundial más importante del sexto. Este hecho representa las ventajas económicas significativas para el país, principalmente debido a la generación de la modernidad y el empleo que esta industria proporciona. La agroindustria guatemalteca del azúcar es constituida por 12 Ingenios activos, situados en la costa del Océano Pacífico, en la parte del sur del país.

El desarrollo de la agroindustria guatemalteca ha estado creciendo y en la cosecha 2000-2001, se procesaron 1,206,221.36 toneladas métricas de azúcar. Esta producción se pone en diversos mercados de esta manera:

- Mercado interior (consumo local): el 30%
- Mercado externo (exportación): el 67%
- Contingente americano (exportación): el 3%

La operación de EXPOGRANEL permitió a la industria azucarera de Guatemala, entrar a competir al mercado Internacional con costos racionales y en igualdad de condiciones que los más eficientes, es la terminal de embarque, responsable de la recepción, almacenamiento y embarque, del azúcar para la exportación, producida por los ingenios guatemaltecos, es una terminal azucarera especializada en la carga de buques, con el propósito de abrir nuevos mercados y hacer del azúcar de Guatemala un producto mas competitivo a nivel mundial.

La industria azucarera de Guatemala ha apostado y sigue apostando por el crecimiento del sector y consecuente con las exportaciones de azúcar, es por ello que surgió el proyecto de Expogranel. En años anteriores con la fuerte competencia de Australia, se logró ganar el contrato para suministrar azúcar a Corea, mostrando que su eficiencia ha permitido rebajar costos a los compradores que prefieren el puerto de Guatemala a otros orígenes. El contraste de lo sucedido hace 30 años en las exportaciones, tipifica los cambios que ha requerido la industria para poder hacer frente a sus necesidades de crecimiento.

Los productos de la industria azucarera en el país normalmente exportados son:

- Azúcar crudo a granel
- Azúcar crudo en sacos
- Azúcar blanco en sacos
- Azúcar blanco a granel y
- Azúcar refino en saco

### 1.2.2 Generación de energía eléctrica

Debido al déficit energético en el país, el gobierno de Guatemala suscribió contratos con la iniciativa privada para que pudieran producir de manera independiente Energía Eléctrica para poder suministrarla a la red nacional, dicha oportunidad de negocio llevó a los Ingenios a suscribir contratos con el gobierno para poder participar, debido a la ventaja de producción que tienen los ingenios con respecto con otros productores de energía eléctrica, Ingenio La Unión S.A. montó una planta Térmica de 26 MW. La cual iba a poder quemar simultáneamente dos combustibles a la vez: Bagazo y Fuel Oil No. 6, además el proyecto contemplaba también vender el excedente que producían los turbogeneradores destinados a la fabricación de azúcar.

La planta de Generación consta de un sistema **Caldera – Turbogenerador Condensing – Torre de Enfriamiento – Auxiliares**, la cual trabaja independientemente del Ingenio, la caldera tiene la capacidad de quemar Fuel Oil No. 6 al 20% y Bagazo al 80 %, con una eficiencia de 39.6 Kw / ton. La planta con capacidad nominal de 26 MW. con vapor a 850 Psig, y 900 °F, 13.8 Kv. 3 fases. Para suministrar la demanda de la fábrica se cuenta con 4 Turbogeneradores de escape, los cuales generan energía eléctrica y vapor para el proceso, el vapor se produce con 5 calderas de tipo acuotubular, que únicamente queman bagazo cuyas producciones y presiones están de acuerdo a las necesidades de consumo tanto para la generación como para el proceso.

Los Turbogeneradores utilizados en la cogeneración de energía eléctrica del ingenio presentan las siguientes características:

- 5 Mw., 400 Psig, 620 °F, 20 Psig de contrapresión, 3,600 Rpm, 2,400 Volts, 3 fases.
- 7.5 Mw., 600 Psig, 750 °F, 20 Psig de contrapresión, 3,600 Rpm, 4,800 Volts, 3 fases.

- 10 Mw., 600 Psig, 750 °F, 20 Psig de contrapresión, 3,600 Rpm, 13,800 Volts, 3 fases.
- 20 Mw., 600 Psig, 750 °F, 20 Psig de contrapresión, 5,600 Rpm, 13,800 Volts, 3 fases.

### **1.3 Generalidades sobre generadores de vapor**

#### **CONCEPTO DE UNA CALDERA**

El término caldera se aplica a un dispositivo para generar:

- a. Vapor para transformación de energía, procesos industriales o calefacción y
- b. Agua caliente para uso general.

La caldera de vapor es un dispositivo en el que se hace hervir agua para producir vapor. El calor necesario para calentar y vaporizar el agua puede ser suministrado por un hogar, por gases calientes recuperados a la salida de otro aparato industrial (horno, por ejemplo), por el fluido refrigerador de una pila atómica, por irradiación solar o por una corriente eléctrica. Cuando el calor es suministrado por un líquido caliente o por vapor que se condensa, se suelen emplear otras denominaciones, tales como vaporizador y transformador de vapor. El sinónimo generador de vapor se emplea de preferencia cuando se habla de calderas de una cierta importancia. Si la caldera propiamente dicha está conectada a otros, de los cuales unos calientan el agua (recalentadores de agua, economizadores) o el aire de combustión (precalentador de aire), y otros recalientan el vapor (recalentadores), suele denominarse el conjunto grupo evaporador, y la parte del grupo en que se produce la evaporación se llama vaporizador o haz vaporizador.



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

La forma de las calderas de vapor ha evolucionado considerablemente y, sobre todo, se ha diversificado, incluso si nos limitamos a considerar las calderas calentadas por hogares. Las primeras calderas consistían esencialmente en recipientes cerrados, cuya parte inferior, llena de agua, estaba sometida a la irradiación de un hogar o al contacto de gases calientes. Para obtener, además, grandes superficies de contacto, se construyeron más adelante calderas con hervidores, situados debajo del cuerpo cilíndrico principal y conectado a éste mediante conductos tubulares. En este sentido ha constituido una nueva etapa, la aparición de las calderas semitubulares, cuyo cuerpo principal está atravesado por un haz tubular.

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

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

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

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

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

La resistencia (b) es pequeña y constante y está representada por el hierro, que es el material más empleado, por 1.5° a 2° de diferencia de temperatura para cada centímetro de espesor de chapa. Las resistencias (a) (c) son más importantes y variables; por el lado de los gases son mayores que por el lado del agua y dependiendo, en ambos, del estado de la superficie, que tiende a cubrirse constantemente de hollín y cenizas por parte de los gases y de los lodos e incrustaciones por la del agua. Es importante hacer mención que se ha visto que la transmisión de calor es tanto más activa, cuanto mayor sea la velocidad con que circula el agua en contacto con la superficie de caldeo.

## **ELEMENTOS DE UNA CALDERA**

### **CÁMARA DE AGUA**

La magnitud de la cámara de agua determina el volumen de este líquido que contiene la caldera y tiene como límite inferior un cierto nivel mínimo, del que no debe descender nunca el agua durante la marcha. El volumen del agua tiene gran influencia en las condiciones de funcionamiento de las calderas, así que existen grandes diferencias entre las que tienen gran volumen y las de pequeño volumen de agua, que cada uno de estos tipos tienen su campo de aplicaciones perfectamente definido, según las condiciones de marcha del generador.

Las calderas con gran volumen de agua son apropiadas para la industria azucarera, talleres de laminación, minas, etc., porque proporcionan grandes cantidades de vapor sin que disminuya mucho la presión y cuando el consumo de vapor es pequeño, la presión no se eleva excesivamente, actuando, por lo tanto, la cámara de agua como regulador del consumo de vapor que hace dichas industrias.

### **CÁMARA DE ALIMENTACIÓN**

Es aquella parte de la capacidad de la caldera que durante el funcionamiento se encuentra ocupada alternativamente por vapor y agua, por lo que su magnitud depende del volumen de la cámara de agua, y es desde todo punto necesario que sea grande cuando se desee aprovechar las ventajas que proporciona el uso de calderas de gran volumen de agua.

## **CAMARA DE VAPOR**

En ella el vapor debe separarse del agua que lleve en suspensión. Cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la válvula de toma de vapor.

### **1.3.1 Tipos de calderas de vapor**

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

#### **1.3.1.1 Pirotubulares**

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

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

Estas calderas con tubos de retorno se utilizan en pequeñas centrales industriales debido a sus pequeñas capacidades de producción de vapor, presiones limitadas y baja velocidad de producción de vapor. La caldera de vapor pirotubular está concebida especialmente para aprovechamiento de gases de recuperación, presenta las siguientes características:

El cuerpo de caldera, está formado por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor. La circulación de gases se realiza desde una cámara frontal dotada de brida de adaptación, hasta la zona posterior donde termina su recorrido en otra cámara de salida de humos.

El acceso al cuerpo por el lado gases, se realiza mediante puertas atornilladas y abisagradas en la cámara frontal y posterior de entrada y salida de gases, equipadas con bridas de conexión. En cuanto al acceso, al lado agua se efectúa a través de la boca de hombre, situada en la bisectriz superior del cuerpo y con tubuladuras de gran diámetro en la bisectriz inferior y placa posterior para facilitar la limpieza de posible acumulación de lodos.

El conjunto completo, calorífugado y con sus accesorios, se asienta sobre un soporte deslizante y bancada de sólida y firme construcción suministrándose como unidad compacta y dispuesta a entrar en funcionamiento tras realizar las conexiones a instalación.

La caldera, una vez realizadas las pruebas y comprobaciones reglamentarias y legales por una Entidad Colaboradora de la Administración, se entrega adjuntando un "Expediente de Control de Calidad" que contienen todos los certificados y resultados obtenidos.

## CLASIFICACIÓN DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES

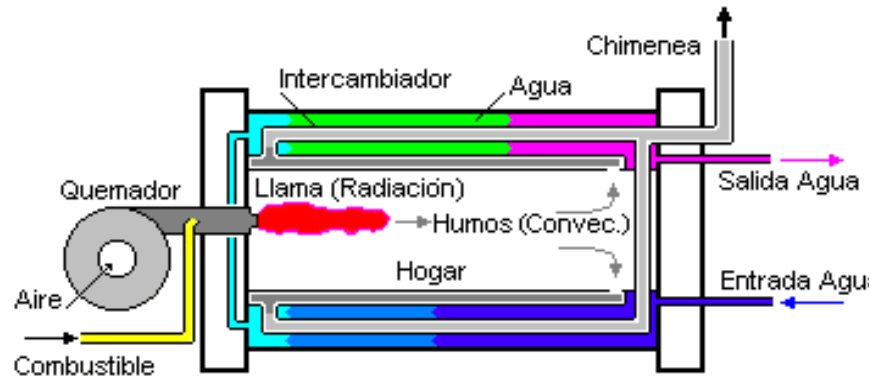
De acuerdo con su construcción, las calderas se clasifican de la siguiente manera:

1. De hogar externo:
  - a. Horizontales tubulares de retorno
  - b. De hogar de caja corta
  - c. Caldera de tipo compacto
  
2. De Hogar interno:
  - a. Horizontales tubulares:
    1. Locomóviles o de locomotora
    2. De hogar corto
    3. Caldera tipo compacto
    4. Caldera de tipo escocés:
      - a. De cabezal posterior seco (cabezal posterior con revestimiento refractario).
      - b. De cabezal posterior de agua (tipo escocés marino).
      - c. De cubierta (o cielo) de agua.
    5. Calderas escocesas tipo paquete:
      - a. De cabezal posterior seco, de cabezal posterior de agua y de tapa de agua.
      - b. De dos, tres y cuatro pasos.
  - b. Calderas verticales tubulares:
    1. Caldera de fuerza, portátil, de cabezal plano, o sumergido:
      - a. De domo recto.
      - b. Caldera de caja de humo cónica.

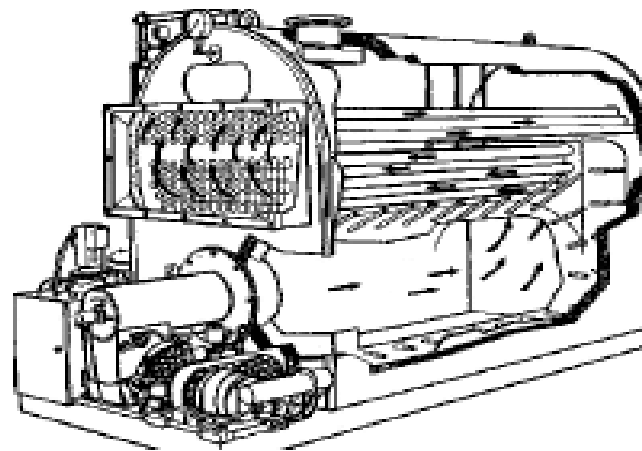
La caldera original de recipiente cilíndrico (tipo marmita), fue inicialmente mejorada mediante el paso de los gases calientes por dentro de los tubos colocados en el interior del cuerpo cilíndrico de las calderas. La caldera de tubos de humo (pirotubulares) se usan generalmente en donde la demanda de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

La caldera de tubos de humo tiene alimentación en cuanto a su tamaño y en la adaptabilidad de su diseño. Tiene sin embargo, la ventaja de su gran volumen de almacenamiento de agua, además de su peculiaridad de compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones en la demanda de vapor. Debido a su gran volumen de agua, el tiempo que necesita para alcanzar su presión de trabajo partiendo de un arranque en frío, es considerablemente menor que el requerido para una caldera acuotubular. Su posibilidad de recalentamiento es limitada y depende del tipo de caldera. Con el aumento de la demanda de vapor, la temperatura de los gases se incrementa rápidamente. Las calderas pirotubulares pueden ser diseñadas para que el recorrido de los gases de la combustión dentro de estas sea de uno, dos o cuatro pasos. La capacidad de las calderas pirotubulares se basa nominalmente en la proporción de  $0.93 \text{ m}^2$ , de superficie de calefacción por caballo de caldera a una cuota de evaporación de 17 a  $24.4 \text{ Kg} / \text{m}^2 / \text{hr}$ . estas calderas trabajan con una eficiencia del 70 %.

**Figura 1. Partes generales de una caldera pirotubular**



**Figura 2. Diseño general de una caldera pirotubular**





### **1.3.1.2 Acuotubulares**

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

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

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

## **CLASIFICACIÓN DE LAS CALDERAS ACUOTUBULARES**

Las calderas acuotubulares se clasifican de la siguiente manera.

1. Caldera horizontal de tubos rectos:
  - a. De cabezal de caja o cabezal seccional
  - b. De domo longitudinal o transversal (cruzado)
  - c. De tipo paquete, con hogar de caja

2. De tubos curvados:

- a. de cuatro domos
- b. de tres domos
- c. de cabezal bajo y tres domos
- d. de dos domos, de tubos oblicuos
- e. de tres domos en forma de “A”
- f. de tubos cortos y tubos largos, de dos domos
- g. de dos domos en forma de “O”

Las presiones superiores a los  $10.55 \text{ Kg / cm}^2$ . ( $150 \text{ lb / plg}^2$ .) y capacidad de más de  $6,840 \text{ Kg / Hr.}$  ( $15,000 \text{ lb / Hr.}$ ), de vapor, se emplea casi exclusivamente la caldera acuotubular.

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

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

pueden construirse para soportar presiones más altas. La superficie de calefacción queda circunscrita exclusivamente a los tubos.

Estas calderas tienen circulación natural de agua, por que el agua de alimentación, precalentada en los calentadores y presurizada por las bombas, entra al domo de agua – vapor, se mezcla con agua saturada del vapor y se descarga al domo de agua por los tubos posteriores. Como los tubos frontales de la caldera se encuentran en contacto con los gases de combustión a mayor temperatura que los tubos posteriores, el agua tiende a fluir hacia el domo superior, es de esta manera como se produce la circulación natural por diferencia de densidades, con excepción forzada. Cuando se habla de calderas supercríticas la circulación es forzada, porque llega un momento que la densidad del agua no cambia en la caldera, normalmente la caldera convencional el agua fría entra en el domo superior y baja al interior porque su densidad es mayor, a medida que se calienta vuelve por medio de otros tubos al domo superior, dándose así la circulación natural.

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

### **CALDERA CON TUBOS CURVADOS**

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

1. Mayor economía en su fabricación y operación, debido al uso de soldadura, aceros mejorados, construcción de paredes de agua y nuevas técnicas de fabricación.
2. Mejor acceso para inspección, limpieza y servicios de mantenimiento.
3. Trabaja con mayor capacidad de evaporación y entrega de vapor más seco.

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

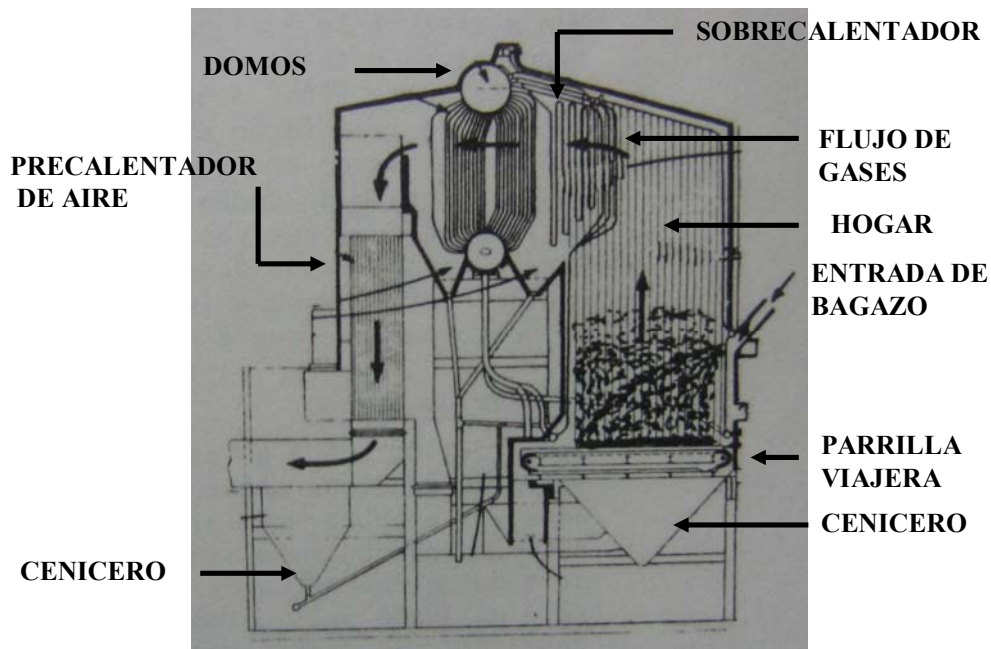
En las unidades modernas de tubos curvados, la capacidad se mantiene en una proporción menor de 29,756 Kg. de vapor por hora, por metro de ancho de caldera (20,000 lb / HR.) Por pie de ancho de caldera, considerando exclusivamente la superficie que absorbe el calor radiante.

Las calderas pequeñas de tubos de agua curvados han sido bastante bien estandarizadas, reduciéndolas a un número relativamente escaso de tipos. Las calderas más populares son de dos y tres domo, de altura reducida, las inclinadas de dos domos, las del tipo "O", de dos domos y de las de tres domos del tipo "A" así como las de diferentes construcciones tipo paquete. Las calderas de tubos curvados presentan una gran flexibilidad en el diseño, sobre todo en relación con la disposición del domo, ya que los tubos se insertan radial a este. El tubo curvado permite también la libre expansión y contracción. Las unidades de gran capacidad con supercalentadores de superficie extremadamente grandes, suelen tener una sección pequeña de superficies de convección que protege al supercalentador de las altas temperaturas, producidas por la combustión de los combustibles en el hogar en la caldera.

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

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

**Figura 3. Diseño general de una caldera acuotubular que quema como combustible bagazo.**



### **1.3.1.2.1 Por su tipo de combustible**

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

#### **1.3.1.2.1.1 Sólido**

Existen varios tipos de combustibles sólidos como el carbón, leña, bagazo de caña, cascarilla de arroz, aserrín, pero en los ingenios azucareros se quema al inicio de la zafra leña y posterior mente el bagazo, o se inicia con fuel oil No. 6 y luego con el bagazo.

##### **1.3.1.2.1.1.1 Bagazo**

El bagazo de caña se ha convertido en una prioridad energética a partir de la disminución real de la disponibilidad de combustibles derivados del petróleo, de los que históricamente ha dependido la economía del país fundamentalmente en los últimos 35 años. El bagazo de caña se ha utilizado siempre como combustible, incluso fundamental en la inmensa mayoría de los ingenios azucareros, donde se ha quemado en un 80 % en sustitución del petróleo a un 20%. En la inmensa mayoría de los ingenios azucareros se quema el bagazo en hornos de tipo pin hole, el cual consiste de chapas de acero aleado o hierro fundido, colocados sobre la tubería que forma el piso del hogar, y el de tipo parrilla viajera, que consiste en un piso montado sobre cadenas, acopladas a un eje que hace su movimiento generalmente hacia delante del hogar para sacar la ceniza acumulada y hornos con parrilla basculante.

Estas calderas utilizan el bagazo para la generación de vapor, es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de la caña. El bagazo representa 30 % de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de este proceso; se obtiene con 50 % de humedad; esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13.5 T. de bagazo, equivalentes a 2.7 toneladas de combustible equivalente a toneladas de calor específico TCE = 37.5 MJ/Kg. (16,122.09 BTU/Lb). 1 BTU representa el calor necesario para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua.

### **CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO COMO COMBUSTIBLE**

En las propiedades del bagazo como combustible influye un grupo de factores industriales que actúan sobre la caña de azúcar como materia prima. Entre los factores industriales están: grado de preparación de la caña para su molienda en el tándem de molinos, presión y desgaste de los molinos, así como la cantidad y temperatura del agua de imbibición.

**Tabla I. Composición química del bagazo**

Elemento químico	Bagazo (%)
Carbón	47.00
Hidrógeno	6.50
Oxígeno	44.99
Cenizas	2.50
Azufre	0.00
Nitrógeno	-

## **CALOR ESPECÍFICO DE COMBUSTIÓN**

Bagazo: 19,900 KJ/ Kg. (8,555.46 BTU/Lb). DE BASE SECA.

## **CONTENIDO DE HUMEDAD**

Esta es la propiedad más importante desde el punto de vista de la producción de vapor. Cuando el trabajo de los molinos es deficiente, es decir, existe un mal ajuste en la presión del último de los molinos, el contenido de humedad del bagazo será superior a 51 %, mientras que con un buen trabajo su contenido será de 49 %, normalmente oscila en un rango estrecho 49 -52 %.

## **CONTENIDO DE CENIZAS**

El bagazo de la caña aporta alrededor de 2.8 % de cenizas; y los residuos agrícolas cañeros, 9.5 % aproximadamente. Se plantea que el porcentaje de cenizas fluctúa entre 0.78 y 3.22, en dependencia del tipo de suelo, forma de alza y recolección.

Los constituyentes de la ceniza varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo con la cantidad de terreno, tipo de abono y variedad de la caña.

## **GRANULOMETRÍA**

La granulometría depende mucho del grado de preparación que tenga la caña en su proceso de extracción de jugo, el número de juegos de cuchillas, desmenuzadoras y molinos, así como su calidad, al aumentar aquellos aumentará el contenido de finos como resultado de la preparación de la fibra. La presión y el grado de desgaste de los molinos son dos factores muy importantes que se deben ir controlando durante la zafra, pues influyen en la granulometría del bagazo.



Una de las características más importantes del bagazo cuando van a ser usadas en reactores de lecho fluidizado, es tener una dimensión uniforme y lo más pequeña posible. En el caso del bagazo, este presenta una característica muy singular: un mismo diámetro del bagazo presenta longitudes muy variadas, ya que existen partículas en forma de fibras muy alargadas y partículas fibrosas pero más cortas, cualidades que lo convierten en un material muy polidisperso.

## **CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS Y AMBIENTALES DEL USO DEL BAGAZO DE CAÑA**

En particular, la caña de azúcar exhibe índices más ventajosos que otros cultivos en cuanto al almacenamiento de energía proveniente de la radiación solar, como se aprecia en los aspectos siguientes:

- Es capaz de almacenar 1.7 % de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1.1 % en campos bien atendidos con regadío.
- Tiene un rendimiento potencial genético que se encuentra entre 200 y 300 t/ha.(tonelada por hectárea), con un máximo teórico de 233 Kg. (624.26 Lb). que se compara ventajosamente con otros cultivos.
- Para un valor calórico de 17,476 MJ/Kg.(7,513,324.6 BTU/Lb) de materia seca (MS), con un contenido de materia seca de 30 % y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es veinte veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla al ingenio.

**Como promedio pueden emplearse las siguientes relaciones de sustitución:**

- 5.2 toneladas de bagazo, 50 % de humedad por tonelada de petróleo 39.7 MJ/Kg. (17,067.92 BTU/Lb).
- Una tonelada de bagazo equivale a 231 m<sup>3</sup>. de gas natural.
- Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja 30 % de humedad: 11.7 MJ/Kg.(5,030.09 BTU/Lb).
- El valor calórico del bagazo (50% humedad) es de 7.64 MJ/Kg. semejante al de la madera: 7.9 MJ/Kg.(3396.39 BTU/Lb).

**1.3.1.2.1.1.2 Carbón**

En este tipo de calderas se utiliza el combustible sólido de origen mineral Carbón para generar vapor. El carbón contiene hidrocarburos volátiles, azufre y nitrógeno, así como cenizas y otros elementos en menor cantidad (potasio, calcio, sodio, magnesio, etcétera).

El carbón de origen mineral se clasifica según su contenido de carbono, por el grado de transformación que han experimentado en su proceso y por el uso al que se adaptan. La escala más recomendada establece cuatro clases: antracita, hulla, turba y lignito.

**1. Antracita**

Carbón duro que tiene el mayor contenido de carbono fijo y el menor en materia volátil de los cuatro tipos. Contiene aproximadamente un 87.1 % de carbono, un 9.3 % de cenizas y un 3.6 % de material volátil. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina. Se utiliza sobre todo como combustible y como fuente de carbono industrial.

Aunque se inflama con más diferencia que otros carbones, libera una gran cantidad de energía al quemarse y desprende poco humo y hollín.

## 2. **Hulla**

Combustible fósil con una riqueza entre 75 y 90 % y un contenido en volátiles que oscila entre 20 y 35 %. Es negra, mate y arde con dificultad con una llama amarillenta. Se diferencia del lignito, por su mayor poder calorífico (entre 30 y 36 MJ/Kg.)(12,897.06 y 15,477.21 BTU/Lb).

En la revolución industrial se le llamo carbón de piedra, se empleaba como combustible y en la siderurgia se usaba para obtener gas ciudad y una gran cantidad de productos químicos, dando lugar a la Carbo - química. Ha sido sustituida por el petróleo y el gas natural. Todavía persisten dos aplicaciones:

- Combustible en centrales térmicas
- Obtención de coque mediante calcinación en hornos cerrados: En España, la mayor parte de la hulla no es coquizable.

## 3. **Turba**

Material orgánico compacto, de color pardo amarillento a negro. Se produce así una carbonificación lenta, en la que la turba es la primera etapa de la transformación del tejido vegetal en carbón. El contenido en carbono aumenta del 40% en el material vegetal original, al 60% en la turba. Tiene un poder calorífico inferior a 8.4 MJ/Kg. (3,611.35 BTU/Lb).

#### 4. Lignito

Variedad del carbón de calidad intermedia entre el carbón de turba y el bituminoso. Suele tener color negro pardo y estructura fibrosa o leñosa. Tiene capacidad calorífica inferior 17,200 KJ/Kg. (7,394.67 BTU/Lb). a la del carbón común debido al contenido en agua (43.4%) y bajo de carbono (37.8%). El alto contenido de materia volátil (18.8%) provoca la desintegración del lignito expuesto al aire.

El término grado se refiere al estado de carbonización a que a llegado el proceso de metamorfismo. En otro tipo de clasificación del carbón se tendría en cuenta el aumento de grado acompañado de:

- Disminución de la humedad natural del carbón
- Disminución de la cantidad de materias volátiles que se desprenden por calentamiento
- Aumento de carbono fijo, es decir, la cantidad de residuos de carbón o coque que quedan después de calentar el carbón
- Aumento de potencia calorífica

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

Los carbones bituminosos son coquizables, es decir, que mediante un proceso de destilación se elimina la materia volátil del carbón, quedando un carbón de muy buena calidad que se denomina coque y que es de gran utilidad en la industria siderúrgica (producción de hierro y acero, este último es precisamente una aleación de hierro y carbono) y metalúrgica.

El término bituminoso se refiere al grado de poder calorífico que tiene el carbón. Los carbones subbituminosos, llamados de flama larga por la forma en que se realiza la combustión, no se pueden transformar en coque y se utilizan en las centrales carbo eléctricas.

#### **1.3.1.2.1.2 Líquido**

Existen varios tipos de combustibles líquidos que son derivados del petróleo como fuel oil No. 6, la gasolina, el diesel. El bunker o fuel oil No. 6 se quema en los ingenios azucareros durante el periodo de zafra en un 20% y después de finalizada la zafra en un 100 %, cuando ya no exista consumo de vagazo como combustible, para la generación de energía eléctrica.

##### **1.3.1.2.1.2.1 Derivados del petróleo bunker o (Fuel Oil No. 6)**

En este tipo de calderas se utiliza el Bunker o también conocido como fuel oil No. 6, para generar vapor. Es un combustible residual de la destilación y craqueo del petróleo. Es un producto viscoso y con ciertos grados de impureza cuyas características generales, exigen métodos especializados para su empleo. La viscosidad es una de sus principales características y debe ser tomada en cuenta para su manejo adecuado. Su uso es principalmente industrial en calderas y quemadores como una fuente de producción de energía.

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

## **PROPIEDADES PRINCIPALES**

### **VISCOSIDAD**

Es una de las propiedades físicas que tiene mayor importancia en la utilización del producto. La norma nacional establece un valor máximo de 300 SSF (635 CST) a 50°C. La viscosidad debe estar acorde a las especificaciones de los equipos, en lo que respecta a bombas, filtros y características de los quemadores.

### **TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN**

Es fijada como un parámetro de seguridad. Tiene especial importancia en el manejo y almacenamiento del producto.

### **AGUA Y SEDIMENTO**

Disminuye el poder calórico del combustible y la temperatura, favoreciendo el punto de rocío y la corrosión. Si presenta valores altos propicia la obstrucción de filtros y boquillas en los quemadores.

### **DENSIDAD**

No tiene relación directa con las características del combustible, pero es un dato necesario para los cálculos de balance de energía.

### **PODER CALÓRICO**

Por ser el búnker un combustible residual, el poder calórico depende de la composición del crudo de origen. Conocer este valor es importante para el cálculo del balance y costo energético del producto. El búnker que distribuye Recope tiene un contenido calórico neto superior a los 9500 Kcal. / Kg. (17,100 BTU/Lb).

**Tabla II. Propiedades del Fuel Oil 6 (Bunker C)**

Pruebas	Unidad	Especificaciones Nacionales (MEIC)	Estadísticas Recope			Método ASTM
			Prom	Mín	Máx	
			.	.	.	
Temperatura de inflamación $\beta$	°C	72 mínimo *	109	82	150	D-93
Agua y sedimentos $\beta$	%	1,0 máximo +	0,21	0,05	1,20	D-2709
Viscosidad cinemática a 50°C	SSF	300 máximo	185	131	221	D-445
Punto de escurrimiento	°C	reportar	0	-12	2	D-97
Azufre	% m/m	3 máximo	2,07	2,16	2,70	D-2622
Densidad a 15 °C	Kg./m <sup>3</sup>	reportar	969	951	986	D-1298
Ceniza	%	0,2 máximo	0,05	0,01	0,09	D-482
Residuo Carbón Conradson	%	20 máximo	10,58	8,13	12,60	D-524
Compatibilidad	Spot test	-	1	1	1	

### **1.3.1.2.1.3 Gaseoso**

Existen varios tipos de combustibles gaseosos como el butano, propano, el gas natural, también se puede mencionar el gas caliente de recuperación (Ciclo combinado) y Altos Hornos, estos gases de combustión son aprovechados por la caldera para la generación de vapor.

#### **1.3.1.2.1.3.1 De recuperación**

La caldera de Recuperación de calor, se utiliza habitualmente en las instalaciones de cogeneración para aprovechar el calor latente de los gases de combustión, se genera vapor de agua aprovechando la energía disponible en los gases de escape de la Turbina de Gas, Motores de combustión y en altos hornos de fundición, etc. El cual se expansiona en la Turbina de Vapor. Las calderas convencionales queman el combustible con cantidad mínima de aire, a fin de minimizar las pérdidas por la chimenea, que asegura la combustión correcta. Las temperaturas que alcanzan los gases de combustión son altas, la diferencia de temperatura con el agua, o vapor, es grande, el flujo de calor es elevado y las dimensiones de la superficie de intercambio de calor pueden ser relativamente pequeñas.

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



### **1.3.1.2.1.3.2 De gas**

Este tipo de calderas utiliza el gas natural para generar vapor. El gas natural extraído de los yacimientos, es un producto incoloro e inodoro, no tóxico y más ligero que el aire. Procede de la descomposición de los sedimentos de materia orgánica atrapada entre estratos rocosos y es una mezcla de hidrocarburos ligeros en la que el metano (CH<sub>4</sub>) se encuentra en grandes proporciones, acompañado de otros hidrocarburos y gases cuya concentración depende de la localización del yacimiento.

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

## **1.3.2 Calderas de vapor y sus accesorios(acuotubular)**

### **1.3.2.1 5Horno u (Hogar)**

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

Los hogares enfriados por agua se utilizan con la mayor parte de unidades de calderas, es decir en su gran mayoría, y para todos los tipos de combustible y métodos

de combustión. El enfriamiento por agua de las paredes del hogar reduce la transferencia de calor hacia los elementos estructurales y, en consecuencia, puede limitarse su temperatura a la que satisfaga los requisitos de resistencia mecánica y resistencia a la oxidación. Las construcciones de tubos enfriados por agua facilitan el logro de grandes dimensiones del hogar y optimas de techos, tolvas, arcos y montajes de los quemadores, así como el uso de pantallas tubulares, planchas o paredes divisoras, para aumentar la superficie absorbente del calor en la zona de combustión. El uso de hogares con enfriamiento por agua reduce las pérdidas de calor al exterior.

Las superficies absorbentes del calor en el hogar, lo reciben de los productos de combustión, en consecuencia, contribuyen directamente a la generación de vapor, bajando al mismo tiempo la temperatura de los gases que salen del mismo. Los principales mecanismos de transferencia de calor se efectúan en forma simultánea. Estos mecanismos incluyen la radiación entre sólidos que proviene del lecho de combustible o de las partículas de combustible, la radiación no luminosa de los productos de la combustión, la transferencia de calor por convección de los gases del hogar y la conducción de calor a través de los materiales metálicos de los depósitos y tubos. La eficacia de la absorción de las superficies del hogar es influida por los depósitos de ceniza o escoria.

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

### **1.3.2.2 Ventiladores**

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

#### **Ventilador de tiro forzado**

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

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

#### **Ventiladores de tiro inducido**

El tiro inducido se consigue con un ventilador de chorro o con un ventilador centrífugo colocado en los humerales, entre las calderas y las chimeneas, o en la base de esta. El efecto de tiro inducido consiste en reducir la presión de los gases por debajo de la presión atmosférica y descargar los gases a la chimenea con una presión positiva.

Cuando se emplea una combinación de tiros inducido y forzado de manera que sobre el fuego del hogar la presión es prácticamente la atmosférica, se dice que el tiro es equilibrado.

### **Over fire**

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

#### **1.3.2.3 Sopladores de hollín**

Los sopladores de hollín normalmente se utilizan para evitar la acumulación de depósitos que obstruyen el paso de los gases; además ayudan a mantener limpias las superficies exteriores de los tubos que componen la caldera, aumentando así la transferencia de calor desde los gases provenientes de la combustión.

Los sistemas de sopladores de hollín se utilizan para mantener la eficiencia de la caldera y su capacidad por medio de la eliminación periódica de la ceniza y la escoria que se adhiere a las superficies que, así, pueden absorber calor. Por medio de corrientes violentas de vapor o aire que se producen en las boquillas del soplador de hollín, se desprende la ceniza seca que se adhiere a la pared así como la escoria, que entonces, caen dentro de un silo o viajan con el resto de los gases de combustión hacia el equipo de purificación.

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

#### **1.3.2.4 Separador de contaminantes**

En la quema de bagazo de caña en calderas de Ingenio La Unión S.A., los sólidos residuales son arrastrados por los gases de combustión, requiriendo la instalación de sistemas de limpieza antes o después de las chimeneas para poder separar los contaminantes, utilizando la separación vía húmeda o scrubbers.

Los lavadores húmedos, usan un líquido para poder remover los contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos de una corriente gaseosa. El líquido lavador lleva a cabo esta separación disolviendo, atrapando, o reaccionando químicamente con el contaminante.

### **1.4 Generalidades sobre contaminantes en calderas de bagazo**

De forma general, los sólidos residuales comprenden, además de ceniza de bagazo, gran cantidad de material no quemado y residuos minerales provenientes del suelo (arena y arcilla).

El total de ceniza esperado puede ser relacionado directamente a la capacidad de generación de vapor de la caldera. La cantidad de bagazo no quemado depende de la eficiencia de combustión de la caldera, la cual depende del tipo y de las condiciones operacionales del equipo. Calderas más modernas tienden a generar menos bagazo no

quemado. Los sólidos minerales dependen de los procesos de cosecha y transporte de la caña y de un adecuado sistema de lavado de la caña en las mesas alimentadoras de caña. Con el aumento de la cosecha mecanizada, y la consecuente reducción de la utilización de agua de lavado en la caña, mayor cantidad de esos sólidos viene siendo transportada hacia las calderas. Todavía, es importante resaltar que cada uno de los sólidos antes mencionados presenta características diferentes de densidad y granulometría, las cuales afectan mucho el comportamiento del proceso usual de separación.

#### **1.4.1 Tipos de contaminantes**

##### **1.4.1.1 Contaminantes por sedimentación**

El agua de alimentación de la caldera, con independencia del tipo de tratamiento usado para procesar el reemplazo, todavía contiene concentraciones mensurables de impurezas. Los productos químicos del tratamiento interno del agua de caldera contribuyen también al nivel de sólidos en el agua de calderas. Cuando se genera vapor, se descarga de la caldera de vapor H<sub>2</sub>O esencialmente puro, y esto permite que los sólidos introducidos en el agua de alimentación se queden en los circuitos de la caldera.

El resultado neto de que continuamente se añaden impurezas y se saque agua pura es un aumento estable en el nivel de sólidos disueltos en el agua de la caldera. Existe un límite para la concentración de cada componente del agua de caldera. Para evitar que se rebasen estos límites de concentración, se saca agua de la caldera como purga y se descarga hacia el desecho.

#### **1.4.1.1.1 Lodos en purga continua**

La purga continua se realiza en el punto de mayor concentración de los sólidos en el agua, usualmente en la parte superior del cuerpo de la caldera (domo superior): Una de las mayores ventajas que tiene la purga continua es que produce menos trastornos en la circulación del agua que la purga de fondo.

El objetivo principal de la purga continua es eliminar la mayor cantidad posible de partículas que se encuentran suspendidas en el agua de la caldera, y reducir su concentración, pues existe un límite máximo aceptable de sólidos en la caldera. Por otra parte el purgado continuo la válvula de purga se mantiene abierta en una posición fija para remover agua en una velocidad estable y mantener una concentración de agua de la caldera, relativamente constante.

El sistema consta de un tubo perforado a lo largo del domo, colocado en la parte inferior del domo superior, el cual se comunica con una válvula de pie a la salida del domo, seguidamente baja hasta un enfriador, de donde se saca la muestra, el flujo se regula por una válvula de globo, la apertura o cierre de la válvula responde a los valores de los sólidos, fosfato de calcio, carbonato de calcio (en calderas de baja presión): hidróxido de magnesio, silicato de magnesio, varias formas de óxido de hierro, sílice adsorbida en los precipitadores y alumina. Etc.

#### **1.4.1.1.2 Lodos en purga de fondo**

Se le llama así a la purga realizada de manera intermitente en el fondo del domo inferior de la caldera. Su objetivo es remover lodos acumulados en la parte inferior del sistema de la caldera. Estos lodos son producidos por la acción de los químicos usados en el tratamiento del agua.

Puede ser suficiente llevar a cabo solamente purgas intermitentes de fondo, si el agua de alimentación es excepcionalmente pura. Estos podrían ocurrir en sistemas que devuelven un alto porcentaje de condensado al tanque de agua de alimentación. La purga intermitente se lleva a cabo manualmente y, por consiguiente, da al operador la opción de realizar purgas frecuentes de corta duración o purgas menos frecuentes de larga duración. El procedimiento de purgas breves se considera preferible, ya que se desperdicia menos agua que ya ha sido tratada y calentada.

La purga de fondo como se le llama se hace por los menos una a cada 8 horas, y depende de los resultados del laboratorio. En la industria azucarera es muy probable que un descuido de operación en la batería de evaporadores, de cómo resultado un arrastre de jugo, llegando este hasta el agua de alimentación de calderas, estos arrastres pasan a las calderas y estas lo entregan al vapor teniendo como consecuencia una contaminación de azúcar en el sistema, lo cual se vuelve peligroso ya que pueden ocurrir tres problemas en el sistema de calderas: depósitos, (caramelizado por temperatura), corrosión y arrastres, ( por el pH de la reacción de la soda con el azúcar.

Los depósitos, en particular las incrustaciones, se pueden formar sobre cualquier superficie de un equipo lavado con agua, especialmente en los tubos de las calderas, en cuanto las condiciones de equilibrio en el agua en contacto con estas superficies sean perturbadas por una fuerza externa, como el calor, cada contaminante tiene una solubilidad definida en el agua, y se precipitará cuando aquella sea excedida. Si el agua esta en contacto con una superficie caliente y la solubilidad de los contaminantes es menor a mayores temperaturas, el precipitado se formará sobre la superficie, causando una incrustación. A las elevadas temperaturas que se encuentran en una caldera, los depósitos constituyentes, causan una mala transmisión de calor y un potencial para la



ruptura de los tubos de la caldera. Los depósitos aíslan el tubo y reducen las tasas a la que puede quitarse este calor, esto lleva aun sobrecalentamiento y a una ruptura del tubo.

Si el depósito no es lo bastante grueso como para causar tal ruptura, todavía puede causar una importante pérdida en la eficiencia, así como una interrupción de la carga de transferencia de calor en otras secciones de la caldera, si ocurriera un arrastre en la tubería de vapor, esto sería muy peligroso ya que ocasionará daños a los alavés de las turbinas.

#### **1.4.1.2 Contaminantes sólidos en la chimenea (voladores)**

Los gases de escape que se obtienen en las calderas, contienen una variedad de subproductos, algunos de los cuales se considera contaminantes del ambiente. Dependiendo del combustible utilizado, así será el peligro que causen estos gases, pues algunos son considerados tóxicos.

Algunos contaminantes están relacionados con la composición del combustible, mientras otros dependen de las características del proceso de la quema del combustible y son sensibles al diseño y variables de la operación de los sistemas de combustión.

Los principales contaminantes que se encuentran en los gases de combustión de las calderas acuatubulares quemando bagazo de caña son:

- a. Partículas de material
- b. Óxidos de nitrógeno
- c. Monóxido de carbón

a. Partículas de material: Son partículas de ceniza, arena y bagazo no quemado de la combustión, que tiene características sólidas que arrastran los gases de escape. El tamaño de estas partículas puede variar en diámetros desde menores a una micra hasta un diámetro milimétrico. Cuando las partículas son más grandes que las mencionadas anteriormente no llegan muy lejos en la atmósfera y fácilmente caen a tierra, cerca de la fuente de combustión. Las partículas pequeñas, que forman la mayor parte del material, pueden permanecer en la atmósfera por largos periodos de tiempo y contribuyen a formar una especie de neblina o bruma que a larga distancia obstruyen la visibilidad.

La composición y cantidad de las partículas generadas en las calderas, se ven afectadas por varios factores que comprenden el tipo de combustible en uso, que en este caso es el bagazo y en el modo de operación de la caldera y las características de la combustión en el horno.

b. Oxido de nitrógeno: es un compuesto formado por partículas de oxígeno y nitrógeno, es un gas incoloro e inodoro, y no se considera dañino a la salud. La formación de “oxido de nitrógeno del combustible” no tiene una explicación muy clara; existen evidencias que este oxido puede reducirse al disminuir la cantidad de oxígeno en la llama.

c. Monóxido de carbono: El monóxido de carbono (CO) es un producto de una combustión incompleta y su concentración en los gases de salida de la caldera dependen de las condiciones de operación de la misma. Las mediciones de CO en los gases de chimenea se utilizan a menudo como un indicador de una combustión pobre. El CO es un gas invisible, inodoro y sin sabor.

### **1.4.1.3 Contaminantes sólidos en la parrilla (en cenizas)**

Por lo regular son materias ajenas al bagazo como piedras, arena, desechos metálicos que provienen de la caña y que pasan en el bagazo a través de los molinos, el problema con estos contaminantes es que pueden obstruir las toberas del aire de combustión, que por lo regular son agujeros de 5 mm, impidiendo el flujo normal del aire; por otro lado estos contaminantes de gran peso, pueden hacer fisuras en la parrilla debido a la caída libre desde los alimentadores de bagazo. Otro contaminante es la misma sacarosa contenida en el bagazo, porque al combustionar llega a caramelizarse solidificándose propiciando también una incrustación que puede tapar los agujeros del aire de combustión.

## **1.4.2 Tipos de separadores de contaminantes**

### **1.4.2.1 Tipo seco**

Los sistemas de limpieza seca controlan las emisiones de gases ácidos (dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), cloruro de hidrógeno ( $\text{HCl}$ ), fluoruro de hidrógeno ( $\text{HF}$ ), etc.) y se utilizan sobre todo en calderas para uso general e industriales, y en algunos procesos de la refinería.

Los separadores de contaminantes secos, funcionan totalmente seco y usan cantidades mucho más pequeñas de líquido que los separadores húmedos. Sin embargo, todos consisten en dos secciones principales: (1) Introducir el material ácido o adsorbente del gas en la corriente del aire, y (2) Control de la partícula y materia en exceso de los productos de la reacción, exceso de material del adsorbente y cualquier otro agente contaminador de partículas en el humo.

Los sistemas de separador seco se pueden categorizar como inyectoros secos del adsorbente. Puesto que los sistemas de separación de contaminantes tipo seco quitan solamente los gases, para la limpieza de estos gases se requiere siempre de un dispositivo para quitar partículas, los dispositivos de control de partículas son generalmente filtros o precipitadores electrostático (PES).

La inyección seca del adsorbente implica la adición de un material alcalino seco (cal o ceniza generalmente hidratada de soda), en la corriente del gas para reaccionar con cualquier gas ácido que esté presente.

El adsorbente se puede inyectar directamente en el conducto del humo delante del dispositivo de partículas del control o en un compartimiento abierto de la reacción. Los gases ácidos reaccionan con los adsorbentes alcalinos, y las sales sólidas se quitan en el dispositivo de control de partículas.

En los sistemas de inyección seca, es donde está el mecanismo la adsorción primaria del retiro de los gases, las moléculas del gas del agente contaminador adhieren al área superficial de las partículas alcalinas. Así, la reacción entre el gas ácido y el material alcalino ocurre en la superficie de estas partículas alcalinas. Los materiales alcalinos son generalmente hidróxido de calcio, que tienen la consistencia de un polvo fino. Estas partículas finas tienen áreas superficiales grandes y son las que ayudan en la fijación de los gases por adsorción de ácidos. El contacto íntimo entre el adsorbente y los gases ácidos alcalinos, es importante para el retiro eficaz del gas adsorbido.

## **LA INYECCIÓN SECA DEL ADSORBENTE**

Es un proceso usado para controlar los gases ácidos inyectando un adsorbente pulverizado en la corriente del humo. El punto de la inyección depende del tipo de adsorbente y de tiempo de reacción requerido. El sistema de inyección seca del adsorbente es un sistema muy simple que consiste en un tanque de almacenaje de adsorbente seco, un alimentador de peso para medir la cantidad requerida de adsorbente, un soplador y la línea de transferencia, y un dispositivo de la inyección tal como un venturi. El material seco o adsorbente es soplado a través de una línea neumática al área de la inyección donde la transferencia a través de la línea neumática, proporciona la fluidificación del material del adsorbente.

## **PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO (PES)**

Un PE es un dispositivo para el control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para movilizar las partículas encauzadas dentro de una corriente de emisión hacia las superficies de recolección. Una carga eléctrica es impartida a las partículas encauzadas cuando pasan a través de una corona, una región donde fluyen los iones en fase gaseosa. Los electrodos ubicados en el centro del plano del flujo se mantienen a un alto voltaje y generan un campo eléctrico que fuerza a las partículas hacia las paredes recolectoras.

En los PES, los recolectores son golpeados, o “martillados”, por varios métodos mecánicos para desprender las partículas, que se desliza descendiendo hacia una tolva en donde son recolectados. La tolva es evacuada periódicamente a manera que ésta se llena. El polvo se retira a través de una válvula hacia un sistema que administra el polvo, tal como una cinta neumática, y después se desecha de una manera apropiada.

En un PE de tipo tubo-alambre, el gas emitido fluye horizontalmente y paralelo a las placas verticales de metal en hoja. El espacio entre las placas varía típicamente entre 19 y 38 cm. (9 y 18 pulgadas).

Los electrodos de alto voltaje son alambres largos con pesas en su extremo inferior, y están colgados entre las placas. Algunos diseños posteriores utilizan electrodos rígidos (tubos huecos de aproximadamente 25 a 40 mm. de diámetro), en vez de alambre. Dentro de cada sendero de flujo, el flujo de gas debe pasar cada alambre en secuencia a medida que fluye a través de la unidad. Las superficies de flujo entre las placas son llamados ductos. Las alturas de los ductos varían típicamente entre los 6 y 14 m (20 a 25 pies).

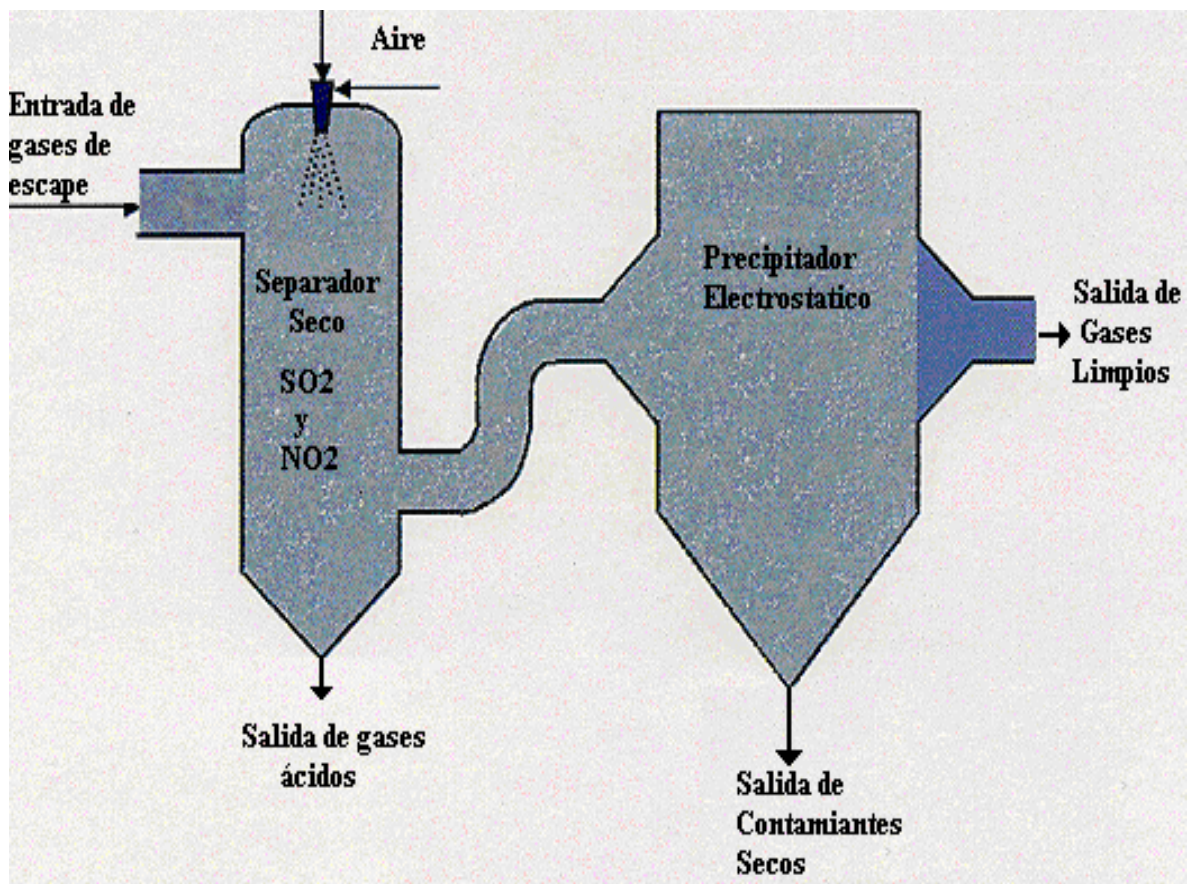
Las fuentes de energía para el PE convierten el voltaje AC industrial (220 a 480 voltios) a voltaje DC pulsante en el rango de 20,000 a 100,000 voltios según sea necesario. El voltaje aplicado a los electrodos causa que el gas entre los electrodos se descomponga eléctricamente, un acto conocido como una “corona.” Se suele impartir una polaridad negativa a los electrodos porque una corona negativa tolera un voltaje más alto antes de producir chispa que una corona positiva.

Los iones generados en la corona siguen las líneas del campo eléctrico desde el electrodo hasta las superficies colectoras. Por lo tanto, cada combinación de tubo y electrodo establece una zona de carga a través de la cual deben pasar las partículas. Puesto que las partículas mayores ( $>10 \mu\text{m}$  de diámetro) absorben varias veces más iones que las menores ( $>1 \mu\text{m}$  de diámetro), las fuerzas eléctricas son mucho más fuertes en las partículas mayores (EPA, 1996).

Ciertos tipos de pérdidas afectan la eficiencia de control. El martilleo que desprende la capa acumulada también proyecta algunas de las partículas (típicamente el 12% en el caso de la ceniza flotante de carbón) hacia la corriente de gas.

Estas partículas reencauzadas son a su vez procesadas de nuevo por secciones posteriores, pero las partículas reencauzadas en la última sección del PE., no tienen la oportunidad de ser recapturadas y de esa manera escapan de la unidad. Debido a los espacios libres necesarios para los componentes internos no electrificados en la parte superior del PE., parte del gas pudiera fluir alrededor de las zonas de carga. A esto se le llama “fuga furtiva” e impone un límite superior sobre la eficiencia.

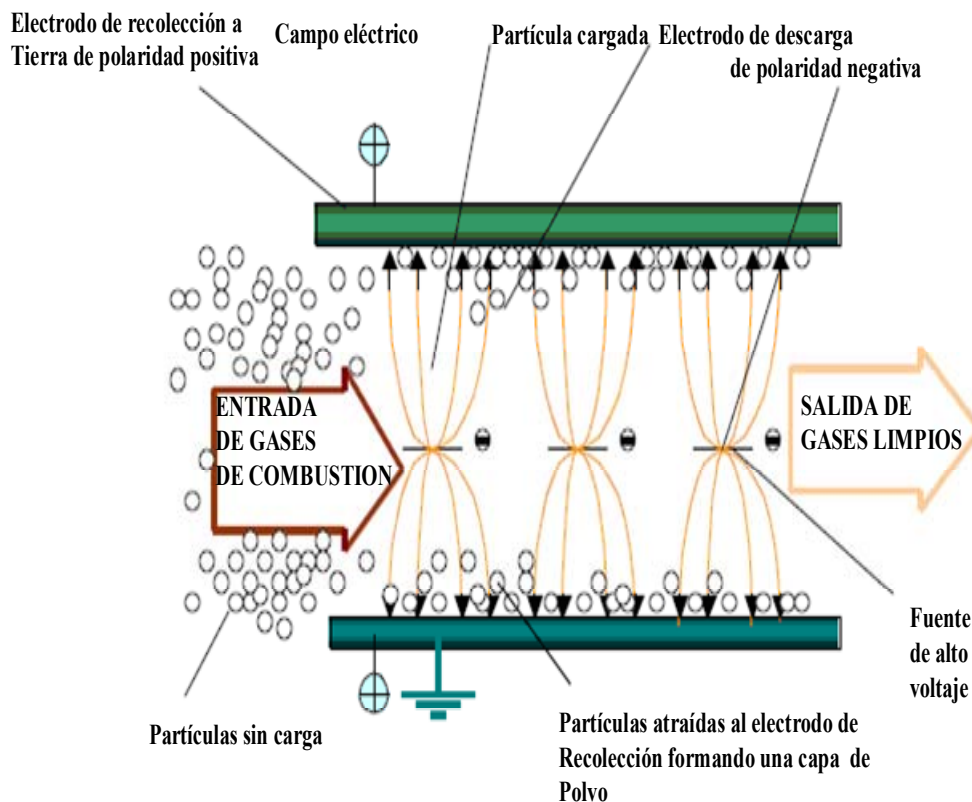
Figura 4. Separador de contaminante tipo seco



## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

Pues el aire contaminado entra en el precipitador electrostático, las partículas pasan a través de un campo eléctrico que da una carga eléctrica a las partículas. Las partículas cargadas pasan con una serie de placas de colector alternativamente cargadas. Las partículas son rechazadas por las placas con la misma polaridad y atraídas a las placas con la polaridad opuesta, similar a cómo un imán de gran alcance funciona.

Figura 5. Operación de un precipitador electrostático





### **1.4.2.2 Tipo húmedo**

Un separador de contaminante tipo húmedo es un dispositivo de control de la contaminación del aire que remueve partículas de material y gases ácidos de las corrientes de gases residuales de fuentes fijas. Los contaminantes son removidos principalmente a través del impacto, difusión, intercepción y/o absorción del contaminante sobre pequeñas gotas de líquido. El líquido conteniendo al contaminante, es a su vez recolectado para su disposición.

Hay numerosos tipos de separadores de contaminantes húmedos las cuales remueven tanto el gas ácido como partículas de material.

Las eficiencias de recolección de los separadores de limpieza húmedas varían con la distribución del tamaño de partículas de material de la corriente del gas residual. En general, la eficiencia de control disminuye a medida que el tamaño de las partículas de material disminuye. Las eficiencias de recolección también varían con el tipo de separador de limpieza utilizada. Las eficiencias de control varían desde más del 99% en separadores de contaminantes tipo venturi hasta 40-60% (o menores) en separadores de aspersion sencillas. Las mejoras en el diseño de separadores de contaminantes tipo húmedos han aumentado las eficiencias de control en el rango submicrométrico.

Los sistemas de separadores de contaminantes húmedos tienen ciertas ventajas sobre los precipitadores electrostáticos (PES) y las casas de bolsas. Los separadores de contaminantes húmedos son más pequeñas y compactas que las casas de bolsas o los PES. Tienen costos de capital más bajo y costos equiparables de operación y mantenimiento (O y M). Los separadores de contaminantes tipo húmedos son

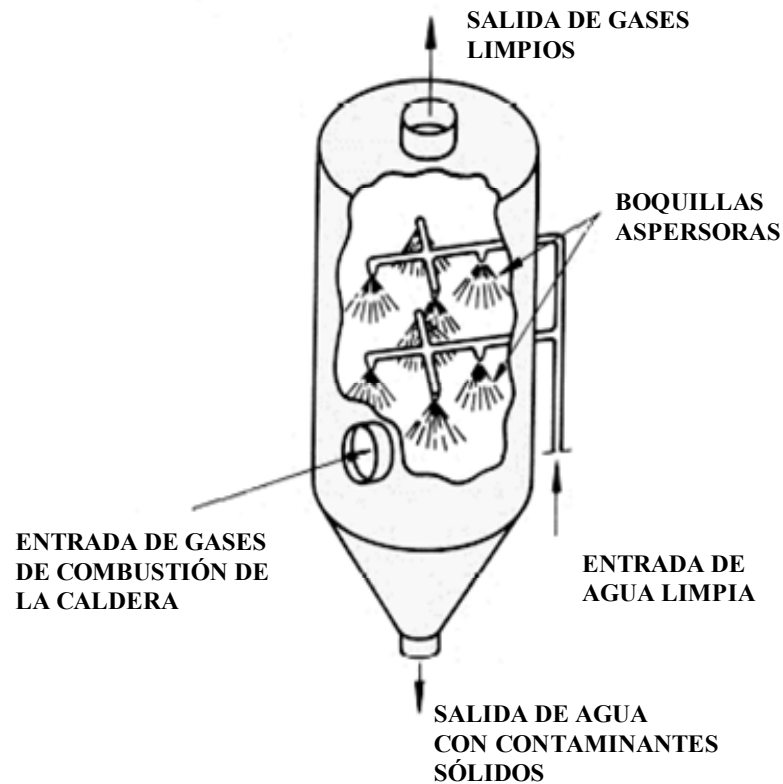
particularmente útiles en la remoción de partículas de material con las siguientes características:

- Material pegajoso y/o higroscópico (materiales que absorben agua fácilmente).
- Materiales combustibles, corrosivos y explosivos;
- Partículas que son difíciles de remover en su forma seca;
- Partículas de material en presencia de gases solubles; y
- Partículas de material en la corriente de gases residuales con alto contenido de humedad.

Los separadores de contaminantes tipo húmedo tienen numerosas aplicaciones industriales incluyendo calderas industriales, incineradores, procesadores de metales, producción de sustancias químicas, producción de asfalto y producción de fertilizantes.

La desventaja principal de los separadores húmedos es que la mayor eficiencia de control se logra a expensas de una mayor caída de presión a través del sistema de control. Otra desventaja es que están limitadas a temperaturas y razones de flujo de gas residual más bajas que en los PES o en las casas de bolsas. Los diseños actuales de los separadores tipo húmedo aceptan razones de flujo de aire de más de 47 metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) (100,000 pies cúbicos reales por minuto y temperaturas de hasta 400 °C (750 °F)). Otra desventaja es que generan residuos en forma de lodo, el cual requiere tratamiento y/o disposición. Por último, pueden resultar problemas de corrosión corriente abajo o de visibilidad de pluma, a menos que la humedad añadida sea removida de la corriente de gas.

**Figura 6 . Separador de contaminante tipo húmedo**



### **1.4.3 Tratamiento de contaminantes**

#### **1.4.3.1 Con aire**

La aplicación de aire como medio de separación de las partículas de material contenidas en los gases de escape de las calderas de vapor, se hace en los separadores ciclónicos, estos utilizan la inercia para remover las partículas de material de la corriente del gas, los ciclones imparten una fuerza centrífuga a la corriente del gas, normalmente en una cámara de forma cónica.

Los ciclones operan creando un vórtice doble dentro del cuerpo del mismo, el gas que entra es forzado a bajar por el cuerpo del ciclón con movimiento circular cerca de la superficie del tubo del ciclón. En el fondo del ciclón, la dirección del gas se invierte y sube en espiral por el centro del tubo y sale por la tapa del ciclón.

Las partículas de material en la corriente del gas son forzadas hacia la pared del ciclón por la fuerza centrífuga del gas en rotación, pero se les opone la fuerza de arrastre del gas que pasa por el ciclón hacia la salida. Con las partículas de material más grandes, la inercia vence a la fuerza de arrastre, haciendo que las partículas alcancen la pared del ciclón y sean colectadas con las partículas de material más pequeñas, la fuerza de arrastre es mayor que la inercia, ocasionando que las partículas salgan del ciclón junto con el gas. La gravedad también hace que las partículas más grandes que llegan a la pared del ciclón bajen hacia la tolva. Aunque utilizan el mismo mecanismo de separación que los separadores por impulso, los ciclones son más efectivos porque tienen un patrón de flujo de gas más complejo.

Por lo general el separador ciclónico se utiliza para eliminar partículas de material con tamaños de 10 micrones o mayor. No obstante, los ciclones convencionales rara vez remueven partículas de material con una eficiencia mayor del 90 por ciento, a menos que la partícula de material tenga un diámetro de 25 micrones o mayor.

#### **1.4.3.2 Con agua**

La aplicación de agua como medio de separación de las partículas de material sólidas contenidas en los gases de escape de las calderas de vapor, se utiliza haciendo pasar el agua a través de boquillas especiales diseñadas para formar spray, logrando así

que las pequeñas gotas de líquido hagan contacto con dichas partículas aumentando su peso y por consiguiente caigan al fondo del separador. El impacto es el principal mecanismo de captura. Cuando los gases de escape se aproximan a una gota de agua, éste fluye a lo largo de las líneas de corriente alrededor de la gota.

Las partículas de material con suficiente inercia mantienen su trayectoria de flujo y se impactan con la gota, debido a su masa, las partículas de material con diámetros mayores de 10 micras son generalmente recolectadas por impacto. El flujo turbulento aumenta la captura por impacto.

Las partículas de material dominadas por las fuerzas de arrastre del fluido siguen la corriente del gas residual. Sin embargo, las partículas de material que pasan suficientemente cerca de una gota de agua son capturadas por intercepción; captura debida a la tensión superficial de la gota. Las partículas de material de aproximadamente 0.1 a 1.0  $\mu\text{m}$ . de diámetro son sujetas a intercepción. Aumentando la densidad de las gotas en la aspersion, se aumenta la intercepción.

Las partículas de material de tamaño muy pequeño están sujetas al movimiento Browniano; movimiento irregular causado por colisiones aleatorias con moléculas de gas. Estas partículas de material son capturadas por las gotas de agua a medida que se difunden a través del gas residual. La recolección debida a la difusión es más importante para partículas de material menores de 0.5  $\mu\text{m}$ . de diámetro. Los mecanismos de captura que se utilizan con menos frecuencia incluyen la condensación y la electrostática. En la limpieza por condensación, se satura una corriente de gas con vapor de agua y se captura la partícula de material cuando el agua se condensa sobre la partícula de material.

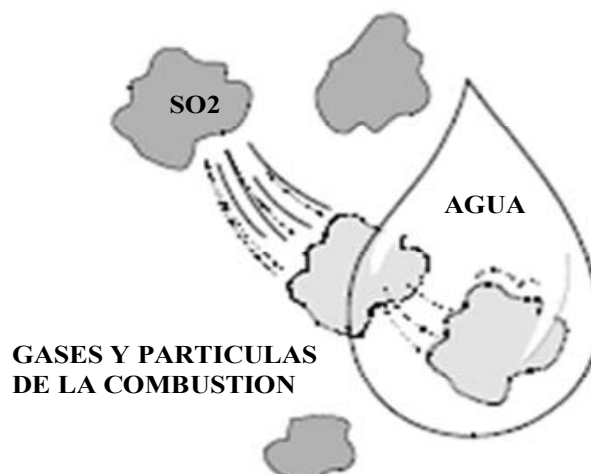
En la limpieza electrostática, se aumenta el contacto colocando una carga electrostática en la partícula, en la gota o en ambas.

## **ABSORCIÓN DE PARTICULAS DE MATERIAL**

Los procesos de absorción son métodos de transferencia de masa desde la corriente de aire que contiene la carga de compuestos orgánicos volátiles (COV) hasta un líquido absorbente, impulsados por un gradiente de concentración. Las soluciones absorbentes incluyen agua, sosa cáustica, aminas y algunos hidrocarburos. El absorbente empleado dependerá de las características de solubilidad del COV a remover. Todos los sistemas de absorción buscan mejorar la transferencia de masa, forzando el contacto de la fase líquida con la fase gaseosa, ya sea en paralelo o a contra corriente. Estos sistemas están diseñados para operar en un amplio rango de eficiencias de remoción entre 70 y 99 %.

El factor más importante que afecta la eficiencia de remoción es la solubilidad del contaminante en el líquido, seguido por la temperatura y el pH.

**Figura 7. Absorción de partículas de material**



## **2. FASE TÉCNICO PROFESIONAL**

### **2.1 Separadores de contaminantes tipo húmedo**

#### **2.1.1 Descripción del sistema en el área de calderas de Ingenio La Unión**

En los separadores de contaminantes húmedos que se encuentran instalados en las calderas tres, cuatro y cinco, el aire cargado de partículas de material entra a una cámara donde hace contacto con una lluvia de agua producida por boquillas de aspersión de tipo espiral de pase libre. Los separadores de contaminantes están colocados en la trayectoria vertical del flujo de gases de combustión de las calderas. La aspersión del líquido ocurre en contra flujo de gases, en donde el gas entra en el fondo del separador y corre hacia arriba, y el agua es aspersada hacia abajo desde las boquillas montadas en un sistema de tuberías colocadas al centro del separador. Las pequeñas gotas de agua capturan las partículas de material suspendidas en el flujo de gas por medio del impacto, intercepción y difusión. Las gotas son suficientemente grandes y caen por gravedad, y todas las partículas de material se recolectan al fondo de la cámara, la cual es conducida por un canal abierto hacia el clarificador de agua de ceniza existente.

#### **2.1.2 Tratamiento del agua**

Los procesos de coagulación y floculación se emplean para el tratamiento de agua, este proceso es utilizado para extraer del agua los sólidos que en ella se encuentran suspendidos siempre que su rapidez natural de asentamiento sea demasiado baja para proporcionar clarificación efectiva.

## **1. Coagulación**

La coagulación consiste en neutralizar la carga, generalmente electronegativa de los coloides presentes en el agua, quedando estos en condiciones para formar flóculos. Este proceso se consigue introduciendo en el agua un producto químico denominado coagulante o floculante.

Es necesario considerar los factores que determinan que las partículas permanezcan en suspensión, así como también aquellos que producen la floculación. Por estabilidad se entiende la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión durante mucho tiempo, mientras que por inestabilidad se expresa la tendencia de dichas partículas a flocularse siempre que entren en contacto entre sí.

### **a) Fuerzas de estabilidad**

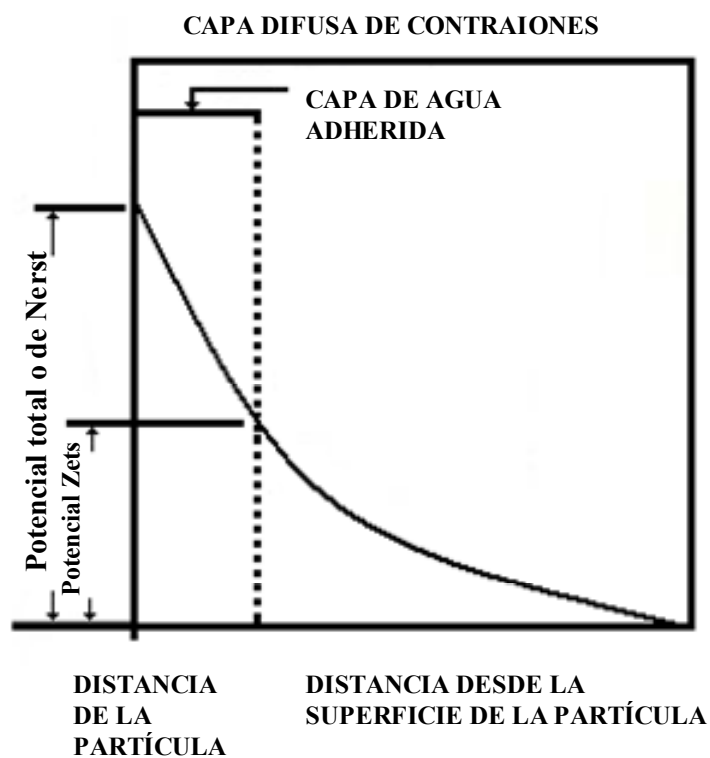
En los sistemas de coloides hidrófilos, se admite que el mantenimiento de la estabilidad se debe al fenómeno de hidratación, es decir las moléculas de agua atraídas hacia la superficie de las partículas que forman una barrera que impide el contacto entre estas. La estabilidad de las partículas hidrófobas se debe en gran parte al fenómeno de la doble capa eléctrica, esta teoría postula que dichas partículas suspendidas en el agua, tienen en su superficie, carga eléctrica (generalmente negativa) que atrae iones de carga opuesta de entre los que se encuentran en el agua. Se forma entonces a su alrededor una capa de iones de carga contraria (denominados contra-iones) que se mantienen cerca de la partícula por efecto de las fuerzas electrostáticas.

De esta forma pueden distinguirse varias capas bien definidas, la superficie de la partícula aparece como un plano que contiene cargas negativas, los cationes de la solución son atraídos hacia esta superficie y a medida que aumenta la distancia desde la partícula, las fuerzas de atracción disminuyen rápidamente dando lugar a una capa difusa de iones que escapan hacia la solución. Como se indica en la figura 8, el potencial



electrostático disminuye exponencialmente desde la superficie de la partícula, hasta llegar a cero cuando las concentraciones de los cationes y aniones presentes son iguales. Es de señalar que el espesor de la capa doble es extremadamente pequeño en comparación con el diámetro de la partícula (del orden de  $10^{-8}$  micrones).

**Figura 8. Estructura de la capa doble**



A cierta distancia de la partícula, dentro de la capa difusa, se establece el llamado “plano de cizalla”, (ver Fig. 8), que representa la porción de agua y de iones que permanecen ligados a la partícula en todos sus desplazamientos. Por tanto, esta capa adherida puede considerarse parte integral de la partícula cargada, impidiendo de esta forma una estrecha aproximación con otras partículas de conformación análoga; en consecuencia, estas capas dobles le comunican estabilidad a la suspensión.

Por tanto, ya no es posible considerar a las partículas coloidales en el agua como porciones discretas de materia suspendida, sino más bien como entidades complejas constituidas por varios componentes. Tanto el espesor de la capa doble como la densidad de la carga superficial son sensibles a la concentración y a las valencias de los iones que se encuentran en la solución y por tanto, la estabilidad de la suspensión puede alterarse de modo notable añadiendo los iones adecuados a dicha solución.

El potencial en la superficie de la partícula (potencial total), conocido con el nombre de potencial de Nerst, es imposible de determinar en muchos casos, pero el segundo (el potencial Z), que existe en el límite entre la parte adherida a la partícula y aquella otra que puede desplazarse con respecto a ésta, es posible de ser medido con un zetámetro.

#### **b) Fuerzas de inestabilidad**

Mientras que los fenómenos anteriormente descritos contribuyen a la estabilidad de las partículas, existen fuerzas que trabajan en sentido opuesto, determinando que estas se desestabilicen o floculen. Los factores que influyen en la inestabilidad de los coloides son fundamentalmente dos:

- El movimiento browniano: Es una evidencia experimental el que partículas con diámetros del orden de  $10^{-6}$  micrones o menores, en el seno del agua, se encuentran en un constante movimiento rápido, desordenado y al azar. La obtención de la energía para dicho movimiento se da por las colisiones de las partículas con las moléculas de agua y por la temperatura del medio, todo este movimiento contribuye a la estabilidad, pero supone una probabilidad de contacto entre las partículas cuyo aglutinamiento en agregados mayores dependerá de la desestabilización electrostática. Así es posible fomentar las

colisiones entre partículas estableciendo gradientes hidráulicos, es decir, recurriendo a la mezcla o creando zonas de turbulencia, no obstante al aumentar el tamaño de la partícula, el movimiento browniano llega a ser despreciable.

- Las fuerzas de London – Van der Waals: pueden describirse como una fuerza atómica cohesiva que existe entre todos los átomos, atrayendo cada uno a todos los demás. Aunque, generalmente, se considera que el radio de acción de esta fuerza es de un orden reducido, en el caso de las partículas coloidales, por efecto de agregación, este radio se amplía hasta dimensiones comparables con las de la de la partícula coloidal. Si las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas se reducen en grado suficiente como para permitir que estas establezcan contactos entre sí (favorecidas por el movimiento browniano), las fuerzas de London - Van der Waals permitirán que las partículas se adhieran unas a otras, lo que se traduce en una aglomeración progresiva de las mismas (floculación). La evidencia experimental, en la actualidad, es que la coagulación (y posterior floculación) de coloides en el agua se logra bastante antes de que el potencial Z se reduzca a cero, ya que este valor suele oscilar entre 5 y -10 mV.

El tratamiento de coagulación óptimo de una agua cruda tiene por objeto lograr un equilibrio muy complejo en el que están implicadas muchas variables. Entre ellas merecen destacarse:

- pH.
- Sales disueltas (composición química del agua).
- Naturaleza de la turbiedad.
- Tipo de coagulante.
- Temperatura.

Tabla III . Tipos de coagulantes

Reactivo	Fórmula	Presentación	Uso	Dosis usual (g/m <sup>3</sup> )	Empleo
Sulfato de aluminio	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2$	Sólida o líquida	Coagulante	10 - 150 (1)	Muy frecuente
Sulfato de aluminio + cal	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento	33 % de (1) + (cal)	Frecuente
Sulfato de aluminio + sosa cáustica	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 + \text{NaOH}$	Sólida o líquida	Ablandamiento	36 % de (1) + (sosa)	Frecuente
Sulfato de aluminio + carbonato sódico	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 + \text{CO}_3\text{Na}_2$	Sólida	Ablandamiento	50 - 100 % de (1) + (carbonato)	Poco frecuente
Aluminato sódico	$\text{AlO}_2\text{Na}$	Sólida o líquida	Coagulante	5 - 50	Poco frecuente
Polímeros de aluminio	Varias	Líquida	Coagulante		Poco frecuente
Cloruro de aluminio	$\text{Cl}_3 \text{Al}$	Líquida	Coagulante		Muy raras veces
Cloruro férrico	$\text{Cl}_3 \text{Fe}$	Sólida o líquida	Coagulante	5 - 150 (4)	Frecuente
Cloruro férrico + cal	$\text{Cl}_3 \text{Fe} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento		Frecuente
Sulfato férrico	$(\text{SO}_4)_3 \text{Fe}_2$	Sólida	Coagulante	10 - 150 (2)	Ocasional
Sulfato férrico + cal	$(\text{SO}_4)_3 \text{Fe}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento	40 % de (2) + (cal)	Ocasional
Sulfato ferroso	$\text{SO}_4 \text{Fe}$	Sólida	Coagulante	10 - 100 (3)	Ocasional
Sulfato ferroso + cloro	$\text{SO}_4 \text{Fe} + \text{Cl}_2$	Sólida y gaseosa	Ablandamiento y desinfección	12 % de (3) + (cloro)	Frecuente
Sulfato ferroso + cal	$\text{SO}_4 \text{Fe} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento	26 % de (3) + (cal)	Frecuente
Cloruro férrico + aluminato sódico	$\text{Cl}_3 \text{Fe} + \text{AlO}_2\text{Na}$	Líquida	Coagulante	100 % de (4)	Poco frecuente
Sulfato cúprico	$\text{SO}_4 \text{Cu}$	Sólida o líquida	Coagulante	5 - 20 (5)	Muy raras veces
Sulfato cúprico + cal	$\text{SO}_4 \text{Cu} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Coagulante	30 % de (5) + (cal)	Muy raras veces
Ozono	$\text{O}_3$	Gaseosa	Coadyuvante y desinfección		Ocasional

Se ha observado que el pH es la variable independiente más importante de entre las muchas a considerar en el proceso de la coagulación de coloides, así mismo, se ha establecido que existe al menos una escala de pH, para un agua dada, dentro de la cual se registra una buena coagulación - floculación en el tiempo más corto. La amplitud de la escala del pH está influenciada por:

- El tipo de coagulante empleado.
- La composición química del agua.
- La dosis del coagulante.

Si ello fuera posible, la coagulación deberá llevarse a cabo dentro de la zona óptima del pH, puesto que en caso contrario se derrochará una cierta cantidad de productos químicos y el agua tratada será de inferior calidad. En el caso de ciertas aguas pudiera ser preciso ajustar el pH con ácido, cal, sosa, etc., con objeto de obtener las condiciones adecuadas; la adición de coagulante en exceso puede ser una forma práctica de reducir el pH, en lugar de adicionar ácido.

## **2. Floculación**

Inmediatamente después de añadir un coagulante al agua, se desencadenan reacciones con los iones para producir compuestos de las especies polinucleares e hidroxio-multipositivos. Las sustancias coagulantes se absorben rápidamente en la superficie de las partículas hidrófobas causantes de la turbiedad, que acaban “revestidas de coagulante”. El resultado neto es que las cargas eléctricas de las partículas se reducen; Entonces según el pH y las dosis de coagulante añadidas, la carga de la partícula, medida en función del potencial  $Z$ , puede oscilar entre ser ligeramente negativo a neutro.

En este momento se considera que la suspensión esta desestabilizada y en consecuencia, el proceso de floculación está a punto de iniciarse. La mezcla, la agitación o la turbulencia favorecen las colisiones entre las partículas desestabilizadas que producen, de esta forma uniones perdurables, por otra parte, los propios coagulantes aún en ausencia de turbiedad, se hidrolizan y precipitan para formar masas cada vez mayores de material floculante. Cuando este flóculo ha alcanzado tamaño suficiente, puede aprisionar físicamente a las partículas de turbiedad, comportándose como una “escoba” a medida que sedimenta.

En contraste, los coloides hidrófilos, que contienen grupos polares de los tipos hidróxilo, carboxilo o fosfático, cargados negativamente reaccionan químicamente con los coagulantes de carga positiva, producidos en la hidrólisis, para formar otro insoluble que es eléctricamente neutro o desestabilizado. El proceso de floculación prosigue de forma análoga al ya descrito para las partículas hidrófobas.

En el proceso de floculación es importante conseguir el flóculo de mayor peso y cohesión posible, ya que estas características facilitan su eliminación, en general algunos de los siguientes medios favorecen el engrosamiento y consecuentemente, la sedimentabilidad del floculo:

- Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
- Un aumento de la cantidad de flóculos en el agua.
- Una agitación lenta y homogénea del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con un flóculo.
- El empleo de ciertos productos llamados floculantes.

Los floculantes, llamados también coadyuvantes de floculación, son productos destinados a favorecer el proceso de floculación es decir, la formación de un flóculo voluminoso, pesado y coherente; la acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo. En muchos casos, los floculantes vienen a resolver problemas importantes, tales como flóculos pequeños, de sedimentación lenta, formados durante la coagulación a baja temperatura o flóculos frágiles que se fragmentan al someterse a las fuerzas hidráulicas en los estanques y filtros de arena.

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico). Entre los floculantes minerales están: la sílice activada y los “agentes adsorbentes - ponderantes”: arcillas, carbonato cálcico, carbón activo, tierra de diatomeas y entre los orgánicos los denominados polieléctrolitos.

Los polieléctrolitos catiónicos cuando se utilizan conjuntamente con coagulantes metálicos tienen las siguientes ventajas: reducción en la dosificación de coagulante, atenuación de la interferencia que sobre la coagulación tienen ciertas sustancias y capacidad de flocular organismos vivos, tales como algas y bacterias.

Los polieléctrolitos tienen un importante campo de empleo cuando la floculación se dificulta como consecuencia de cambios de calidad del agua o de la influencia de las temperaturas bajas. Tienen, también, destacadas ventajas con respecto a la sílice activada, entre las que pueden citarse:

- Facilidad de preparación.
- Facilidad de almacenamiento.
- Dosificación menor.

La floculación puede tener lugar en un aparato especialmente diseñado para este fin (flóculador) o en el interior del decantador propiamente dicho. La elección del tipo de flóculador está en relación con la elección del procedimiento de separación utilizado en la continuación del tratamiento, esta elección debe ser especialmente cuidada cuando la floculación es de tipo difuso y va seguida de la decantación estática o flotación.

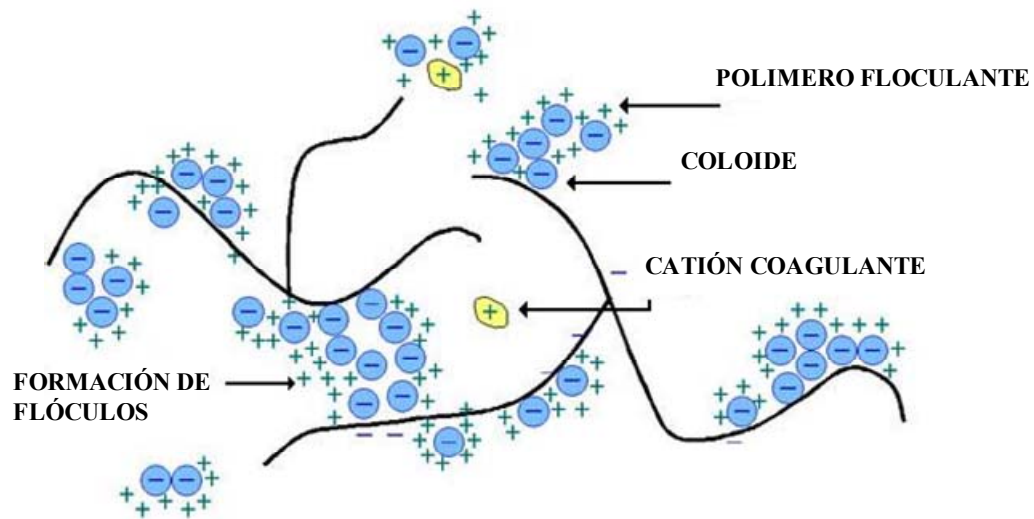
### **2.1.3 Tratamiento de contaminantes**

#### **2.1.3.1 Su formación**

Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas de material individuales en aglomerados, como se muestra en la figura 9. El alumbre, las sales de hierro y los polímeros de peso molecular alto son floculantes comunes. La floculación es estimulada por un mezclado lento que junta poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelve a formar en su tamaño y fuerza óptima. La floculación no sólo incrementa el tamaño de las partículas de material, sino que también afecta su naturaleza. La reunión de estos flóculos pequeños en conglomerados mayores (floculación) se realiza con ayuda de polímeros polieléctrolíticos, que permiten la decantación a velocidades altas de sedimentación. Debido a que la coagulación y la inmediata etapa de floculación ocurren muy rápidamente, como se muestra la figura 9.



**Figura 9. Formación de flóculos**



### 2.1.3.2 Su remoción

El objeto de la decantación es el de conseguir que se depositen las partículas de material que se encuentran en suspensión en el agua, tanto si se trata de partículas presentes en el agua bruta como si se deben a la acción de un reactivo químico añadido en el tratamiento e incluso de las que resultan de una floculación física ligada a una acción biológica. El mecanismo de sedimentación descrito para partículas granulares o de ceniza estaba basado en una total independencia de cada partícula; este esquema, sin embargo, no es válido para en general para la sedimentación de partículas floculadas, puesto que en él producen dos fenómenos de acción opuesta:

- Por una parte, un flóculo en su sedimentación atraparà nuevas partículas coloidales o incluso otros flóculos más pequeños, aumentando su volumen y por tanto su velocidad de caída.
- Por otra parte, si la concentración de estos es alta, los flóculos comenzarán a establecer contactos entre sí, dificultándose mutuamente la caída.

Si bien en el caso de sedimentación de partículas flocculantes, la velocidad de caída dependerá en gran medida de la concentración de estas también depende, de muchas otras variables tales como: carga superficial, gradientes de velocidad en el sistema y gama de tamaños; no obstante el efecto de estas variables solo puede determinarse mediante ensayos de sedimentación, a este tipo de sedimentación se le conoce como sedimentación difusa; pero cuando predomina la tendencia entre las partículas a estorbarse, se le denomina sedimentación frenada.

De esta última, que se estudia por medio de la teoría de Kinch, cuya hipótesis fundamental dice que la velocidad de caída de una partícula depende únicamente de la concentración local.

## **2.2 Criterios de ingeniería en el diseño del clarificador de agua.**

Para la estimativa del flujo de agua necesaria a la unidad de tratamiento de agua de ceniza proveniente de los scrubbers de las calderas de Ingenio La Unión S.A. consideramos las capacidades de producción de vapor de las calderas existentes.

- 1 caldera de 180,000 Lb/hr. (Libras de vapor por hora)
- 2 calderas de 150,000 Lb/hr. (Libras de vapor por hora)
- 1 caldera de 300,000 Lb/hr. (Libras de vapor por hora)

Total de vapor generado: 780,000 Lb/hr = 354 Ton/hr. (Toneladas de vapor por hora)

$$\text{Total de Agua Necesaria} = 354 \text{ Ton/hr} \times 2.2 \text{ m}^3/\text{Ton/hr} = 780 \text{ m}^3/\text{h}.$$

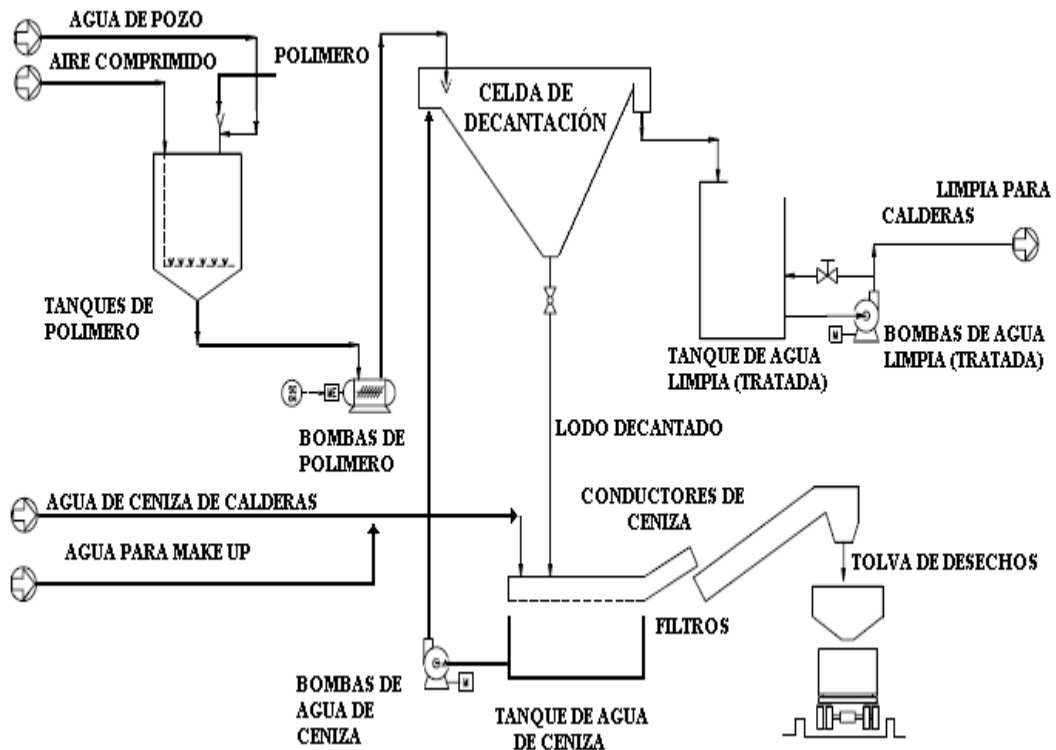
### Cantidad de celdas de decantación

- Capacidad por Celda =  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- Cantidad de Celdas para atender a la ceniza en el agua =  $780 / 200 = 3.9$
- Celdas = 4 Celdas

### 2.3 Descripción de los equipos utilizados en el sistema de clarificación de agua

Para el proceso de clarificación de agua es necesaria la utilización de varios equipos, como se muestra en la siguiente figura 10.

**Figura 10. Diagrama de flujo y equipos utilizados en el proceso de clarificación de agua**



### 2.3.1 Conductores

Para el proceso de clarificación de agua se necesitan tres conductores:

El conductor 1 y 2 está fabricado de lámina ASTM A-36 de 1/4" en su totalidad, de 48" de ancho por 32" de alto por 73' pies de largo, estos conductores poseen en su interior cinco telas filtro, las cuales son de tipo Vee Wire con una área de filtrado de 80 pies cuadrados, estos conductores poseen una parte horizontal que mide 40 pies de largo, donde se encuentran las telas, estos conductores se encuentran equipados con una bandeja en la parte de abajo, la cual recibe el agua producto de la filtración y la envía por gravedad hacia el tanque de agua sucia, además estos conductores poseen una parte inclinada que mide 33 pies de largo a 23° , la cual hace su descarga al conductor 3.

Para su movimiento los conductores poseen un motor eléctrico de 10 Hp. 1,750 Rpm, acoplada a una caja reductora de ratio 18:1, que tiene un Sprocket de 19 dientes y la cadena RC 160 doble que trasmite al movimiento al eje motriz del conductor que tiene un Sprocket de 19 dientes, la cual hace que el conductor tenga una velocidad de 108.18 pies/minuto. Además las tablillas que transportan la partícula de material que se filtro son fabricadas de madera, hule y angular de acero ASTM A-36, son 51 en total. Estas tablillas se encuentran distribuidas a siete eslabones entre si, montados sobre la cadena tipo rivetless 458 de (4" de paso).

El conductor 3 está fabricado de lamina ASTM A-36 de 1/4" en su totalidad, tiene una medida de 36" de ancho por 30' de alto por 70 pies de largo, esta inclinado a 25°. Para su movimiento el conductor posee un motor eléctrico de 10 Hp. 1750 Rpm, acoplada a una caja reductora de ratio 18:1, que tiene un Sprocket de 19 dientes y la cadena RC 160 doble que trasmite al movimiento al eje motriz del conductor que tiene un Sprocket de 60 dientes, la cual hace que el conductor tenga una velocidad de 34.45 pies/minuto. Estos conductores reciben toda la partícula de material filtrada de los conductores 1 y 2, las cuales transportan por medio de tablillas fabricadas de madera, hule y angular de acero ASTM A-36, a la tolva de desechos, son 49 en total. Estas

tablillas se encuentran distribuidas a ocho eslabones entre si, montados sobre la cadena tipo rivetless 458 de (4" de paso).

**Figura 11. Conductores**



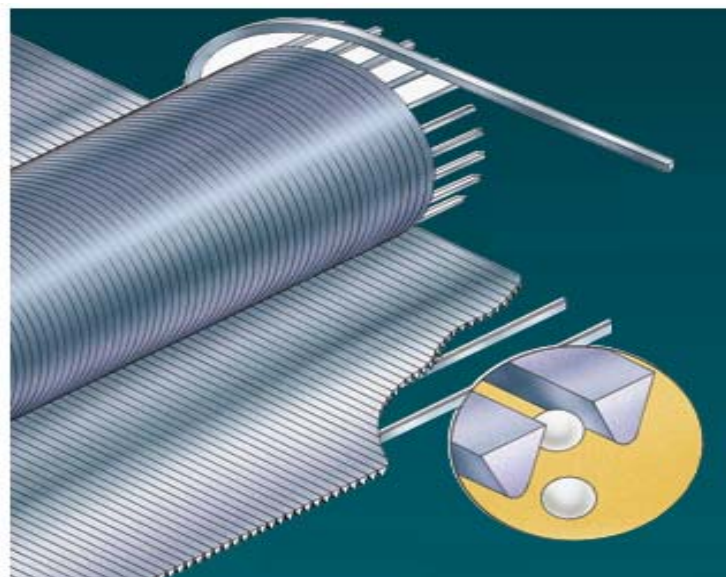
**Figura 12. Transmisión del conductor**



### 2.3.2 Filtros

Los filtros que utilizan los conductores 1 y 2 son de tipo Vee-Wire como se muestra en la figura 13, son de (0.020" de abertura), con un porcentaje de área abierta de 21.97, y un perfil de construcción No. 69, el área de filtrado para cada tela es de 16 pies cuadrados. Estos filtros están dispuestos en los conductores 1 y 2, el objetivo del filtrado es para poder remover todas las partículas de material, ceniza, arena, bagazo no quemado de la combustión, del agua proveniente de los lavadores de gases de calderas, logrando obtener una agua con partículas de material muy finas para el proceso de clarificación. Este proceso de filtrado es muy importante para el proceso de floculación que se efectúa en los decantadores, por que estas partículas de material grueso, bagazo no quemado de la combustión no tiende a decantar y por flotación ocurrirá una acumulación de estas en la parte superior de las celdas de decantación, logrando una contaminación del agua clarificada.

**Figura 13 . Filtros de tela tipo Vee - Wire**



### **2.3.3 Tanques**

Para la clarificación de agua de ceniza proveniente de los lavadores de gases de las calderas es necesaria la utilización de dos tanques.

1. Tanque de agua de ceniza.
2. Tanque de agua limpia

#### **1. Tanque de agua de ceniza**

El tanque de agua de ceniza es utilizado para recibir el agua de ceniza proveniente de los scrubbers de las calderas, tiene una capacidad máxima de 12,976 galones de agua con ceniza, está fabricado en su totalidad de concreto de forma rectangular. Para el proceso de clarificación se debe de trabajar aproximadamente a 3/4 de su capacidad para mantener el nivel de operación, luego esta agua acumulada es bombeada a los decantadores para su proceso de limpieza.

#### **2. Tanque de agua limpia**

El tanque de agua limpia es utilizado para recibir el agua proveniente del proceso de clarificación (celdas de decantación), tiene una capacidad máxima de 7,355 galones de agua limpia, está fabricado en su totalidad de concreto de forma rectangular. Para el proceso de clarificación se debe de trabajar aproximadamente a 3/4 de su capacidad máxima para mantener el nivel de operación, luego esta agua acumulada es enviada de nuevo al proceso de lavado de gases de calderas (scrubbers).

### 2.3.4 Bombas

Para el proceso de clarificación de agua es necesaria la utilización de tres tipos de bombas:

1. Bomba semi Vortex
2. Bomba centrífugas
3. Bomba de desplazamiento positivo

#### 1. Bombas semi Vortex

La bomba Semi Vortex, es una bombas centrifugas con impulsor semi abierto, que utiliza un motor eléctrico 90 Kw (125 Hp); 1185 Rpm. 460 V. Esta bomba es especial para el bombeo de agua y ceniza, que tiene una capacidad máxima de bombeo de 870 m<sup>3</sup>/ hora (3830.5 Gpm), tiene un diámetro de impulsor de 20 pulgadas fabricado de acero inoxidable, esta bomba utilizan aceite ISO VG 68 para lubricar sus partes móviles. Estas bombas son utilizadas para bombear toda el agua y ceniza proveniente de los lavadores de gases (scrubbers), hacia las cajas de entrada de las cuatro celdas de decantación de ceniza para el proceso de clarificación. Esta bomba tiene una succión de 20 pulgadas de diámetro y una descarga de 18 pulgadas.

**Figura 14. Bomba semi Vortex**





## 2. Bombas centrífugas

Es una bomba centrífuga horizontal de impulsor cerrado de doble succión, que utiliza un motor eléctrico de 90Kw (200 Hp). 1800 Rpm. 460 V. Esta bomba es especial para el bombeo de agua, tiene una capacidad de bombeo de 4000 Gpm, el impulsor es de bronce y tiene un diámetro de 13.5 pulgadas. Estas bombas son utilizadas para bombear toda el agua limpia proveniente de las celdas de decantación, hacia los lavadores de gases scrubbers. Esta bombas tiene una succión de 12 pulgadas de diámetro y una descarga de 16 pulgadas de diámetro.

**Figura 15. Bomba centrífuga**



### 3. Bombas de desplazamiento positivo

Es una bomba rotativa volumétrica de desplazamiento positivo, las piezas principales, que configuran el sistema son, una pieza rotativa, el “rotor”, y una pieza fija, el estator. El rotor es un tornillo con paso extremadamente grande, con profundidad de filetes grandes y con un diámetro de núcleo pequeño (es decir, es un husillo sin fin helicoidal de sección circular geométrica de 1/2 paso). El estator tiene dos o tres filetes y una longitud de paso de 2 o 1.5 vez de la del rotor. Esto permite que entre el estator y el rotor queden cavidades vacías que se aprovechan para el acarreo o transporte. Cuando el rotor gira dentro del estator, estas cavidades se desplazan continuamente del lado de la entrada al de la salida.

Estas bombas utilizan un motor eléctrico de 0.75 Hp. 1750 Rpm. 220 V. La bomba tiene un caudal de 2 m<sup>3</sup>/h., 8.8 Gpm. trabaja a 12 bar (174 Psig) de presión. Estas bombas dosificadoras son utilizadas para transportar el polímetro floculante hacia la caja de entrada de los decantadores.

**Figura 16. Bomba volumétrica de desplazamiento positivo**



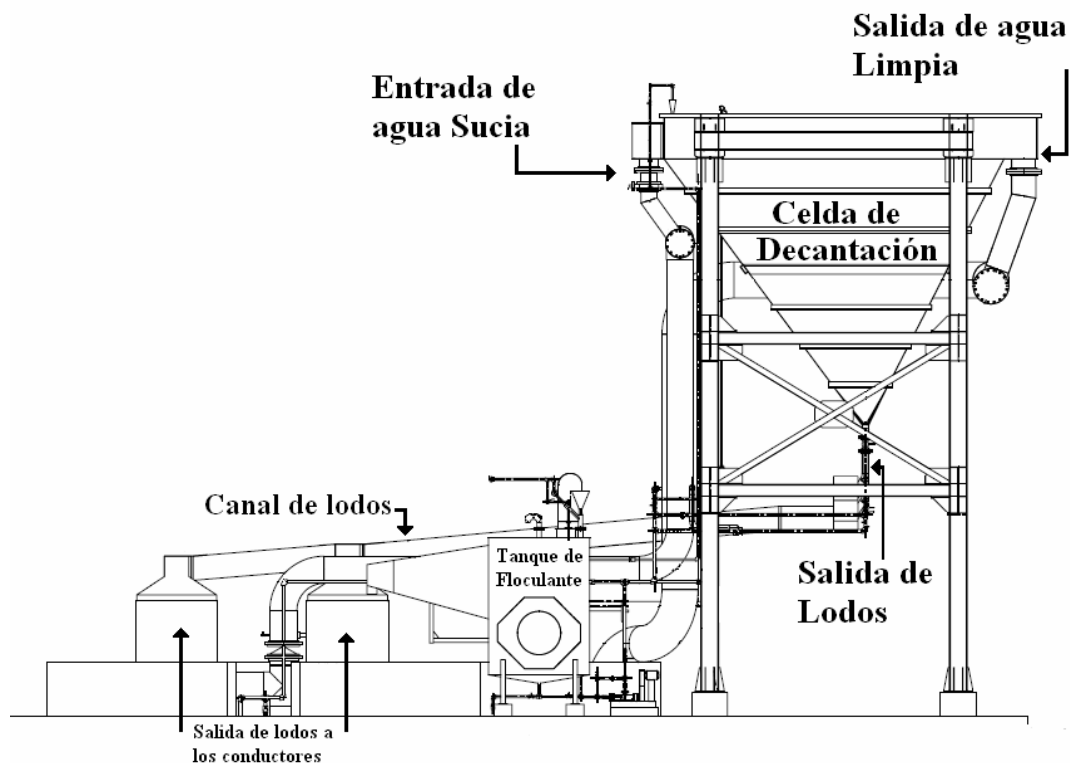
### **2.3.5 Celda de decantación**

Las celdas de decantación son utilizadas para tratamiento de agua de ceniza. Las celdas son construidas en su totalidad de lámina ASTM A-36 de 1/4", estas celdas tienen una capacidad de 200 m<sup>3</sup>/h de agua cada una, con dimensiones de 13.12' x 19.7', respectivamente como se muestra en la figura 17. El Sistema es compacto, de fácil montaje, el sistema consiste en cuatro celdas de decantación que fueron instaladas en paralelo, para manejar 800 m<sup>3</sup>/h de agua a tratar, lo que permite operar en cualquier capacidad y además futuras ampliaciones.

El proceso desarrollado por la ENGENHO NOVO utiliza la decantación para la clarificación del agua de ceniza oriunda del lavado de gases y ceniceros de calderas que queman biomasa, que fue proyectado en Ingenio La Unión S.A. El sistema opera en circuito cerrado, con el retorno del agua tratada, exenta de sólidos, a los lavadores y ceniceros, eliminando riesgos de taponamiento y de desgaste por abrasión en las boquillas aspersoras. La economía de agua y la excelente calidad del agua tratada, que garantiza una buena eficiencia de lavado de gases, genera retorno financiero y socio-ambiental inmediato, con baja inversión de implantación y operación.

El sistema es compacto y modular, pudiendo ser proyectado para operar en cualquier rango de caudales. La celda de decantación especialmente para la separación de partículas de material en el agua constituyentes de la ceniza, conjuntamente con la arena y el bagacillo mal quemado de la combustión de las calderas que operan en Ingenio La Unión S.A. logrando eliminar estos contaminantes por medio del lavado de gases (scrubbers), para luego dar a esta agua su clarificación efectiva, por medio de las celdas de decantación.

**Figura 17. Celda de decantación**

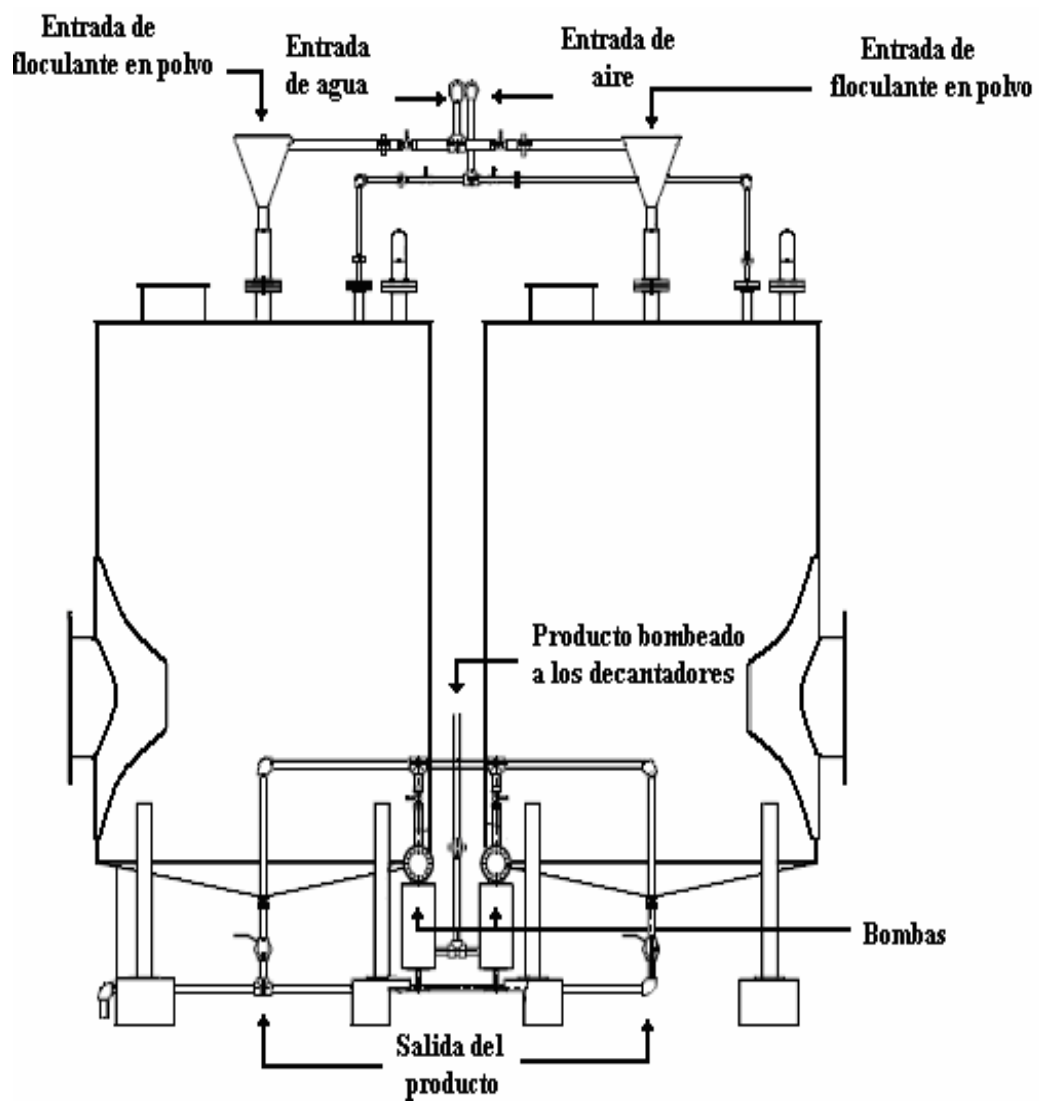


### **2.3.6 Tanques de floculante**

Los tanques de floculante son de forma cilíndrica, están fabricados de lámina ASTM A-36 de 1/4", los cuales son utilizados para la preparación del polímero floculante, tienen una capacidad máxima de 1,415 galones, estos tanques están diseñados en la parte superior con una entrada de forma cónica para la disolución de floculante en polvo, una entrada de agua, y una entrada de aire, como se muestra en la figura 19. Para la operación de clarificación de agua se debe de trabajar aproximadamente a 3/4 de su capacidad máxima, luego de ser preparado el polímero,

las bombas dosificadoras se encargan de bombear el producto hacia la cámara de entrada de los decantadores para su aplicación.

**Figura 18. Tanques de floculante**



### 2.3.7 Compresor de aire p/ agitar

El compresor de aire utiliza una transmisión por banda, es de doble cilindro de un solo paso, tiene un tanque de almacenamiento de forma cilíndrica de 300 litros (75 galones), trabaja a una presión máxima de 120 Psi, el motor tiene una potencia de 7 Hp. un voltaje de: 115V/230V 60 HZ. el cabezal trabaja a 1480 Rpm.

Este compresor es utilizado para la preparación de floculante, el cual suministra aire a los agitadores que se encuentran instalados en el fondo de los tanques de floculante para una mayor disolución de producto, para la operación de clarificación no se necesita presión de aire, este compresor debe trabajar de 1 a 2 horas, cada vez que se tenga que preparar el polímero floculante.

**Figura 19. Compresor de aire**



### 2.3.8 Válvulas

Para regulación de agua en las tuberías del clarificador de agua de ceniza fueron utilizadas válvulas de mariposa, válvulas de esfera o (bola), válvulas cheque.

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos. La válvula de mariposa y de bola son instrumentos de control más esenciales en la industria. Las válvulas de mariposa utilizadas para la regulación de flujo en la succión y descarga de las bombas de agua sucia y de agua limpia tienen las siguientes características: válvulas de mariposa de hierro fundido de CL 150, tipo wafer, sello de “Buna N”, disco de acero inoxidable, accionamiento manual con reductor en el volante de diferentes diámetros.

En la regulación de flujo de agua sucia en la caja de entrada a las celdas de decantación y para la regulación de flujo hacia los scrubbers se utilizaron válvulas de mariposa de hierro fundido CL 150, tipo wafer, sello de “Buna N”, disco de acero inoxidable, accionamiento manual de diferentes diámetros; para la regulación de flujo de lodos en las celdas de decantación se utilizaron válvulas de bola de acero al carbón, de dos cuerpos, sello de teflón, bola de acero inoxidable serie 309, flangeada; para la regulación de flujo en las tuberías de floculante se utilizaron válvulas de bola, acero al carbón de 3 cuerpos, sello de teflón, bola de acero inoxidable serie 304, CL 150 de extremidades roscadas de diferentes diámetros.

Las válvulas cheque utilizadas son de hierro fundido tipo wafer, disco inoxidable, partida con empaque de “Buna N” de diferentes diámetros, utilizadas para la descarga de las bombas de agua sucia y agua limpia. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie líquidos.

**Figura 20. Válvulas de mariposa**



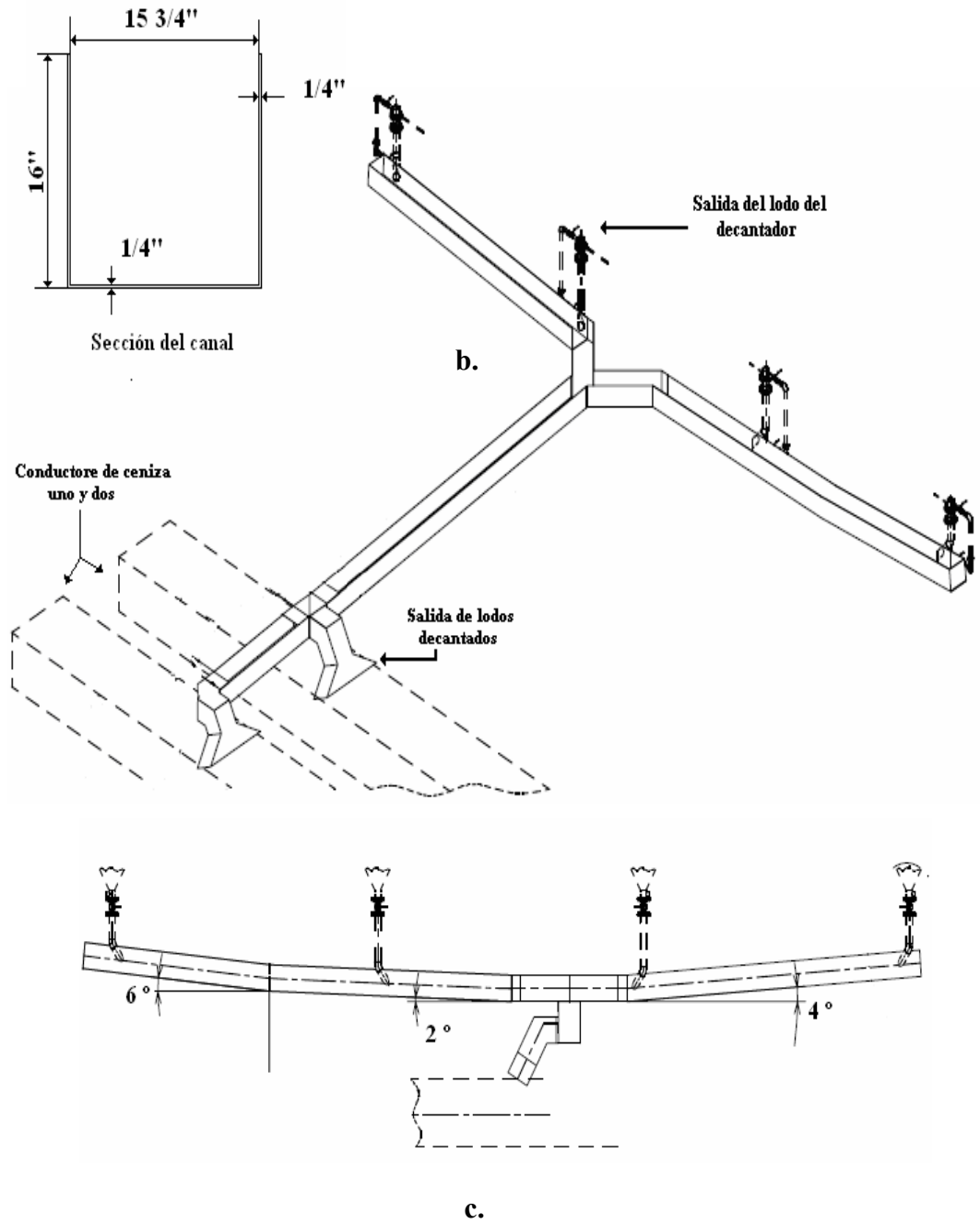
### **2.3.9 Canal de lodos**

El canal de lodos figura. 21(a), es una canal abierto que tiene una sección rectangular que mide de alto 16" X 15 3/4" de ancho, esta fabricado con lamina de 1/4 de pulgada, esta diseñado para que los lodos decantados sean removidos por gravedad, este canal tiene un ángulo de inclinación de 6°,2° y 4° como se muestra en la figura. 21(c), para que los lodos proveniente de la decantación puedan conducirse hacia los conductores de ceniza, figura. 21 (b). El canal de lodos transporta un volumen de 5.9 Toneladas por hora de lodos decantados de las cuatro celdas de decantación.



Figura 21. Canal de lodos

a.



### 2.3.10 Tolva de desechos

La tolva de desechos esta fabricada en su totalidad de lamina ASTM A-36 de 1/4", es utilizada para almacenar y luego desechar a un camión de volteo toda la cantidad de lodos decantados en el proceso de clarificación de agua de lavados de gases de calderas, estos lodos son transportados por medio de los conductores 1, 2 y 3 hacia la tolva de desechos. La tolva de desechos tiene una capacidad máxima de 6 tolenadas, se encuentra equipada con un mecanismo hidráulico motor-bomba hidráulica con accionamiento manual para poder abrir y cerrar la compuerta de descarga de lodos.

**Figura 22. Tolva de desechos**



## **2.4 Operación del clarificador**

El agua conteniendo partículas de material proveniente de los lavadores de gases (scrubbers), y ceniceros de las calderas 3, 4 y 5 son recibidos en un canal abierto, la que fluye por gravedad hacia el clarificador, toda esta agua pasa por uno o los dos conductores filtros existentes, en donde se filtra o separa el agua y toda la ceniza o partículas de material gruesa que viene de los scrubbers y ceniceros de las calderas y todos estos sólidos son transportados por los conductores hacia la tolva de desechos. Esta agua filtrada todavía conteniendo ceniza y arena muy fina, es recibida por medio de bandejas en la parte de abajo con un grado de inclinación, para que toda esta agua filtrada sea conducida por gravedad hacia el tanque de agua de ceniza.

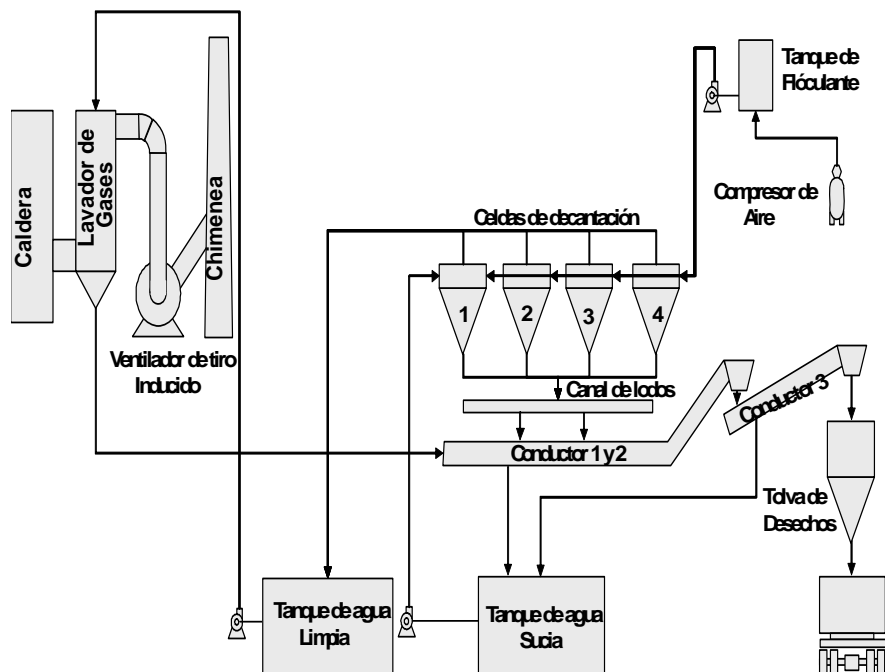
El agua con ceniza y sólidos que es bombeada por medio de la bomba tipo Semi - Vortex, para la caja de entrada de las celdas de decantación, en donde recibe el polímero floculante, proveniente de la estación de preparación de polímero floculante, por medio de las bombas dosificadoras.

Después de la etapa de floculación de la ceniza, el agua con ceniza sigue adentro de las cuatro celdas de decantación hasta la cámara de decantación, donde los flóculos de ceniza sedimentan en el fondo de las celdas, formando el lodo, mientras el agua tratada o clarificada, rebalsa a través de los vertederos, y es conducida por gravedad hacia el tanque de agua limpia. El agua clarificada entonces es bombeada de vuelta a los lavadores (scrubbers) y ceniceros de las calderas para así cerrar el ciclo.

El lodo decantado es retirado continuamente por gravedad por el fondo de las cuatro celdas de decantación en un flujo pre-ajustado, todo este lodo decantado es desechado al canal de lodos, para luego ser conducidos por gravedad hacia los filtros, donde contiene una pequeña cantidad de agua, y esta pequeña cantidad de agua es removida por medio de los filtros y todo el lodo que queda retenido es arrastrado por los

conductores de tablillas hacia el tercer conductor, que lo transporta hacia la tolva de desechos, de dónde es retirado por un camión de volteo, mientras la corriente líquida pequeña removida que pasó por los filtros regresa por gravedad por medio de las bandejas que se encuentran debajo de los conductores hacia el tanque de agua de ceniza, para ser reciclada para el proceso.

**Figura 23. Diagrama esquemático del proceso de clarificación de agua de ceniza de lavado de gases en calderas**



## **2.4.1 Procedimientos de arranque**

### **2.4.1.1 Pruebas**

Las pruebas que se deben de realizar siempre, antes de poner en marcha el sistema de clarificación de agua de lavado de gases de calderas son las siguientes:

1. Prueba hidrostática
2. Prueba de rotación de motores eléctricos
3. Prueba de conductores de tablillas

#### **1. Prueba hidrostática**

La prueba hidrostática consiste en llenar con agua la tubería y levantarle presión hasta 1.5 veces la presión de operación normal. Esta prueba es realizada para ver si la tubería con la que se va trabajar tiene alguna fuga en alguna de las juntas de soldadura o en algún accesorio utilizado en la tubería, esta prueba se le debe de realizar a todas las tuberías utilizadas en la clarificación de agua.

Normalmente la prueba hidrostática debe ser realizada siempre que se instale alguna tubería nueva o después de reparaciones donde produjo algún cambio de tubería o accesorios.

El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente:

1. Verificar que los motores y bombas del sistema de alimentación de agua se encuentren en perfecto estado.
2. Abrir las válvulas de alimentación a las celdas de decantación mientras se bombea agua para la prueba y poder sacar el aire acumulado en la tubería, luego cerrar la válvula y luego aplicarle una presión hidrostática 1.5 veces la presión de trabajo.
3. Mientras la tubería está sometida a presión observar si existen fugas en la soldadura y en las válvulas de alimentación del decantador.
4. Si existe fugas de agua, se deben hacerse las reparaciones necesarias y luego volver a hacer la prueba hidrostática de la misma forma.
5. Cuando la prueba ha finalizado, hay que tener mucho cuidado de reducir lentamente la presión para evitar cambios violentos de tensión de las partes sometidas a presión.

## **2. Prueba de rotación de motores eléctricos**

Esta prueba se realiza desacoplando las bombas con los motores eléctricos, para verificar si está bien la rotación del motor eléctrico. Para el motor eléctrico de la bomba centrífuga que es utilizada para el bombeo de agua limpia, debe tener una rotación CCW, vista desde el motor. El motor eléctrico de la bomba Semi - Vortex, que es utilizada para el bombeo de agua de ceniza, debe tener una rotación CCW, vista desde el motor y la bomba utilizada para la dosificación de floculante, debe tener una rotación CW, vista desde el motor. Esta prueba siempre se realiza después de una instalación nueva o una reparación de mantenimiento del motor eléctrico o bomba.

### **3. Prueba de conductores de tablillas**

Esta prueba se realiza verificando la rotación del conductor en un tiempo de una hora aproximadamente, para ver si existe algún descarrilamiento del mismo debido a que algunas tablillas topan en los bordes del conductor, esto se da siempre en la reparación y fabricación de tablillas ya que en muchos casos estas quedan un poco grande y no deslizan y se logran trabar y produce un descarrilamiento. La otra falla en la que pueda existir descarrilamiento es que la cadena se encuentra muy floja o muy tensa, lo que provocara descarrilamiento debido al movimiento de rotación del conductor.

#### **2.4.1.1.1 Preparación para el arranque**

Antes de poner en marcha el sistema de tratamiento de agua de ceniza se debe verificar el procedimiento descrito a continuación:

- Verificar si todos los motores se encuentran conectados o están en situación de stand by o sea que respondan a las botoneras on - off.
- Verificar si el polímero floculante está debidamente listo, previamente bien preparado y en cantidad disponible para operación del sistema en régimen continuado.
- Chequear la dosificación de polímero floculante a ser utilizada y el correspondiente flujo a ser ajustado en las bombas dosificadoras.
- Chequear si las siguientes válvulas de operación están correctamente para la partida:
  - Válvulas de succión de bombas deben estar completamente abiertas.

- Válvulas de drenaje de lodos en el fondo de los decantadores, deben estar cerradas.
- Válvulas de descarga de las bombas deben estar reguladas.
- Válvulas de alimentación en la entrada de las cuatro celdas de decantación deben estar abiertas.
- Válvulas de la bomba de polímero floculante, para la dosificación de polímero deben estar abiertas (seleccionar solo una bomba). Nota. Al operar las bombas dosificadoras las válvulas de succión deben estar abiertas, ya que la bomba no puede trabajar en seco por que se arruinaría el estator.
- Válvulas donde se da la aplicación del polímero floculante para cada celda de decantación deben estar abiertas.
- Válvulas en la distribución hacia los scrubbers deben estar abiertas.

#### **2.4.1.1.2 Arranque**

Con los procedimientos mencionados anteriormente se procede a continuación a:

- Accionar los conductores.
- Llenar tanque de agua sucia.
- Iniciar el bombeo de agua de ceniza, hacia la caja de entrada de las celdas de decantación.
- Iniciar la dosificación de polímero accionando las bombas.
- Chequear la alimentación de polímero en el punto de aplicación en las celdas de decantación y ajustar un flujo parejo para todas.
- Cuando el agua empieza a revalzar por los vertederos de las cuatro celdas de decantación, se chequea el nivel de agua limpia en el tanque, cuando



tenga un nivel aproximadamente de 3/4, se debe de encender las bombas de agua limpia.

- Iniciar la retirada de lodo por la tubería de fondo de los cuatro decantadores.
- Abrir la válvula de reposición de agua (make-up) y observar la perfecta operación del mecanismo, cuando este alto el nivel se debe de cerrar y cuando este bajo debe de abrir, esto se hace para observar si esta trabajando en perfectas condiciones y no tener problemas con el agua de reposición.
- Proceder al ajuste fino de la retirada de lodo y de la dosificación de producto floculante.
- Proceder a la retirada de lodo con camión cuando la Tolva de Lodo esté llena.

#### **2.4.1.1.3 Parada**

Las instrucciones abajo conducen a que el clarificador de agua de ceniza de una condición de operación normal, en régimen, a una condición de parada completa. Tales procedimientos son los siguientes:

- Interrumpir el flujo de agua de ceniza para las celdas de decantación, apagando las bombas de agua de ceniza.
- Mantener el drenaje de lodo por el fondo de las celdas de decantación, recirculando el agua que pasa por los conductores filtros, para el tanque de agua de ceniza. Ajustar el flujo de las bombas de agua de ceniza, para lograr mantener el nivel del tanque.
- Apagar bombas de floculante.

- Drenar bien los fondos de las celdas de decantación, hasta que no salga más lodo.
- Cerrar la válvula de Lodo de dreno de fondo de las celdas de decantación.
- Drenar todo el lodo en el canal y pasar agua para limpieza de las mismas.
- Proceder a la limpieza de los filtros.

#### **2.4.1.2 Llenado de agua de tanques y celdas de decantación**

Para el llenado de los tanque y celdas de decantación, en el arranque es necesario la utilización de agua de proceso de fabrica, esta agua es introducida en el departamento de calderas y es conducida hacia el tanque por medio del canal abierto que nos servirá para transportar el agua oriunda del lavado de gases en calderas, el nivel del tanque de agua limpia y agua de ceniza debe de ser aproximadamente de 3/4 de su capacidad máxima. En este proceso de llenado de agua de tanques y celdas de decantación, se bombea agua a las cuatro celdas de decantación, hasta el nivel de operación, este nivel de operación es definido por el posicionamiento de los vertederos instalados en la salida de agua limpia de las celdas de decantación. El ajuste de los vertederos debe ser hecho al final del montaje y antes de iniciada la operación de clarificación de agua de ceniza. Para llenar de agua las cuatro celdas de decantación se deben estar abiertas las válvulas de alimentación para posibilitar el efecto de vasos comunicantes entre las celdas de decantación. Las celdas de decantación deben ser llenadas hasta que el agua empiece a rebalsar por los vertederos, una vez llenos se debe ajustar las alturas de los vertederos a través de sus tornillos de ajuste, hasta que los niveles en todas las celdas de decantación estén iguales (nivel del agua en la base de los dientes de los vertederos) y equilibrados en toda su extensión.

**Figura 24. Altura y nivel de operación del decantador**



### **2.4.1.3 Regulación de flujo de agua clarificada**

El flujo de agua para el tratamiento de clarificación de agua de ceniza no debe sobrepasar los límites máximos de flujo establecidos para el proyecto, en el proyecto se establece manejar un flujo de 800 m<sup>3</sup>/h. (3.500 GPM).

El flujo de agua a ser enviada para las calderas debe ser ajustado manualmente a través del mecanismo de la válvula de mariposa que se encuentra ubicada en la descarga de la bomba, esta debe estar a 3/4 de su capacidad de abertura, esta agua es succionada del tanque de agua limpia y es bombeada hacia las calderas para el proceso de lavado de gases y ceniceros. En el tanque de agua limpia existe un control de nivel por medio de electrodos, que por medio del cual nos indicara cuando el nivel del agua este alto y bajo, en donde se podrá controlar la reposición de agua (make-up) del agua que es perdida en el sistema debido a las perdidas de humedad y a las perdidas de vapor en el humo. Esta

reposición de agua ocurre en el canal que conduce el agua con ceniza desde las calderas hasta el clarificador de agua de ceniza.

#### **2.4.1.4 Regulación de flujo de lodos**

Para la regulación de flujo de lodos se debe de llevar un acompañamiento periódico de las siguientes condiciones principales de proceso:

1. Nivel de lodos de las celdas de decantación
2. Acumulación de lodos en las celdas de decantación
3. Flujo de lodo

##### **1. Nivel de lodo en las celdas de decantación**

El lodo decantado en el fondo de las cuatro celdas de decantación debe ser continuamente drenado mientras el sistema esté en operación, evitándose así la acumulación de lodos en las celdas de decantación. Su retirada es hecha a través de las válvulas de lodo instaladas en las salidas del fondo de las celdas de decantación. El ajuste del flujo de lodo debe ser hecho en base al nivel de lodo observado en las celdas de decantación, este nivel de lodos es verificado empíricamente por medio de un tubo de PVC de 1", el cual se sumerge para ver el nivel de acumulación de lodos en las celdas de decantación. De manera general, para una referencia, se puede ajustar el flujo de lodo al rededor de 10% del flujo de agua de ceniza alimentado a las celdas de decantación, pudiendo tal flujo ser alterado dependiendo de la cantidad de sólidos existentes en el agua de ceniza.

## **2. Acumulación de lodos en las celdas de decantación**

Siempre que la cantidad de sólidos que llega al clarificador de ceniza oriunda de las calderas fuera más grande que la cantidad de sólidos que es desechada del sistema a través de la tolva, ocurre una acumulación de sólidos en las celdas de decantación, llevando a un aumento en el nivel de lodo en el interior de las celdas de decantación. Con el aumento del nivel de sólidos, se reduce el tiempo de retención para la decantación de los sólidos (debido a la reducción del volumen de decantación disponible), reduciéndose así, la capacidad de tratamiento del sistema, y favoreciendo la salida de pequeños flóculos de impureza más livianos junto a el agua tratada.

Para reducir el nivel de sólidos acumulados en las celdas de decantación es necesario aumentar la cantidad de sólidos que es removido de la salida de lodos de las celdas de decantación, esto quiere decir de que cuando tengamos, una acumulación de lodos en las celdas de decantación, debemos de abrir mas la válvula de drenaje de lodos para poder lograr bajar el nivel de lodo acumulado.

## **3. Flujo de lodo**

Siempre que el flujo de lodo drenado por el fondo de las celdas de decantación es cambiado, ocurre siempre un ajuste natural del sistema, hasta que una nueva condición de equilibrio es alcanzada. Para una misma cantidad de carga de sólidos alimentada a las celdas de decantación, cuando mayor sea el flujo de lodo ajustado, menor será la concentración de sólidos en el lodo en equilibrio, y vice-versa. Sin embargo, con el aumento del flujo de lodo y su consecuente reducción en concentración, la eficiencia de los conductores filtros en la retención de los sólidos en el lodo será menor, causando un aumento en el lodo (en flujo y en cantidad de sólidos) reciclado para el proceso, esto se refiere a los lodos que son recibidos o reciclados en la parte de abajo de los conductores

filtros y este reciclo es enviado por gravedad hacia el tanque de agua sucia y este es bombeado a las cajas de entrada de las celdas de decantación, entonces las celdas se llenan con un cierto flujo de lodo, el cual afectaría la eficiencia de remoción de sólidos en el clarificador de agua de ceniza. De esa forma, cuando se ajusta el flujo de lodo drenado de las celdas se debe tener en mente el objetivo mayor del proceso, que es la maximización de la cantidad de sólidos removida por el clarificador de agua de ceniza, lo que puede ser acompañado a través de la observación de la cantidad de lodo arrastrado en los conductores 1, 2 y 3 para la tolva de desechos.

Importante destacar que, una vez cambiado el flujo de lodo, la nueva condición de equilibrio requiere un cierto tiempo para ser alcanzada. Así siendo, cuando el flujo de lodo es cambiado, se debe observar por un cierto tiempo la respuesta del sistema, hasta que la nueva condición de equilibrio sea alcanzada.

**Figura 25. Válvula de drenaje de lodos de las celdas de decantación**



#### **2.4.1.5 Sistema de filtrado**

El sistema de filtrado en el clarificador de ceniza se efectúa en los conductores filtros, los cuales están dispuestos en cinco unidades en cada conductor, tiene un área total de filtrado de 80 pies cuadrados, este filtrado tiene dos características principales de operación.

1. Filtrar toda la partícula de materia gruesa ceniza o combustible no quemado (Bagazo) del agua proveniente de los lavadores de gases scrubbers, para que no exista acumulación por flotación de partículas gruesas en el decantador. Esta agua filtrada es conducida por medio del recibidor inclinado, instalado debajo de los conductores hacia el tanque de ceniza que se encuentra también debajo de los conductores, y la partícula gruesa es removida por las tablillas de los conductores hacia la tolva de desechos.
2. Filtrar o remover la pequeña cantidad de agua que traen los lodos sedimentados en el decantador, esta agua filtrada es reciclada de la misma manera descrita anteriormente y los sólidos son arrastrados por las tablillas de los conductores hacia la tolva de desechos.

#### **2.4.1.6 Remoción de lodos**

La remoción de los lodos de las celdas de decantación es realizada por medio de válvulas de bola instaladas en el fondo de las celdas, este lodo drenado es enviado a través de un canal abierto, este recibe los lodos de las cuatro celdas de decantación y por gravedad es enviado hacia los conductores filtros, que están equipados con filtros, para aprovechar el sistema de filtrado y poder remover la pequeña cantidad de agua que traen

lo lodos decantados hacia los recibidores que están instalados debajo de los conductores y por gravedad conducidos hacia el tanque de agua sucia para su recicló, y los sólidos filtrados son arrastrados por medio de las tablillas de los conductores No. 1 y 2 de ceniza hacia el conductor No. 3, que es un conductor inclinado y este es el encargado de llevar los sólidos provenientes de los conductores No. 1 y 2 hacia la tolva de desechos y es así como se efectúa la remoción de sólidos en un clarificador de ceniza oriunda del lavado de gases de calderas.

#### **2.4.1.7 Make-up o agua de reposición**

El make-up o agua de reposición, es aquella agua que se le adiciona al sistema debido a las pérdidas de vapor en la chimenea y a las pérdidas que se generan en la remoción de lodos, debido que los lodos llevan un porcentaje de humedad, la cual es pérdida en la tolva de desechos. Toda esta agua perdida es equivalente al 10 % del flujo utilizado para la clarificación de agua de ceniza, esto equivale a 350 GPM. La reposición de esta agua ocurre en el tanque de agua limpia, por medio de una tubería que lleva esta agua desde las calderas hasta el clarificador de agua de ceniza.

En el tanque de agua limpia, existe un control de nivel de electrodos, este nivel es el que nos indicara cuando tengamos un nivel alto y un nivel bajo debido a las pérdidas, en base a este nivel se accionara la válvula del make-up, para estabilizar el sistema en base al flujo manejado.



## 2.5 Sistema de dosificación y preparación de floculante

### 2.5.1 Cálculo de floculante

La solución puede ser preparada con concentración desde 0.05 hasta 0.20 % p/v, (partículas por volumen) (0.5 hasta 2.0 gramos / litro). Para preparación de una solución a 2 gramo / litro, se procede de la siguiente forma:

- Volumen útil del tanque: 5.0 m<sup>3</sup>.
- Masa de producto a ser disuelta en un tanque: 5.0 Kg.
- Disolución: 5,000 gramo / 5,000 litros = 1.0 gramo / litros.

A continuación se presentan dos ejemplos de consumo para las condiciones medias esperadas para el tratamiento de agua de ceniza.

Ejemplo 1:

- Preparación de la solución de polímero a ser usada: 2 gramo/ litro.
- Flujo de agua de ceniza: 700 m<sup>3</sup>/h.
- Dosificación: 1 g/m<sup>3</sup> (1 ppm)
- Consumo de solución: 1 g/m<sup>3</sup> x 700 m<sup>3</sup>/h / 2 g/litro = 350 l/h.
- Tiempo de utilización de un tanque: 5.000 litros/ 350 l/h = 14.3 horas.
- Consumo de producto: 1 g/m<sup>3</sup> x 700 m<sup>3</sup>/h x 24 h/día = 16.8 Kg./día o 504 Kg./mes => 20 bolsas de 25 Kg./mes

## Ejemplo 2:

- Preparación de la solución de polímero a ser lista: 1 gramo/ litro.
- Flujo de agua de ceniza: 800 m<sup>3</sup>/h.
- Dosificación: 0,8 g/m<sup>3</sup> (0.8 ppm).
- Consumo de solución:  $0.8 \text{ g/m}^3 \times 800 \text{ m}^3/\text{h} / 1 \text{ g/litro} = 640 \text{ l/h}$ .
- Tiempo de utilización de un tanque:  $5.000 \text{ litros} / 640 \text{ l/h} = 7,8 \text{ horas}$ .
- Consumo de producto:  $0.8 \text{ g/m}^3 \times 800 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/día} = 15.4 \text{ Kg./día}$  o 462 Kg./mes => 19 bolsas de 25 Kg./mes

Para reducción de los costos con polímero floculante, se recomienda ajustar su dosificación en el valor mínimo necesario para obtención de una calidad de agua con los requisitos necesarios para su utilización en el lavador de gases (scrubbers).

### 2.5.2 Tipo de floculante

**Polímero Floculante: ZETAG 7692 marca Ciba**

- Forma de Actuación:  
El polímero floculante promueve la floculación de las impurezas en el agua de ceniza, acelerando su decantación.
- Especificación:  
Polieléctrolito Catiónico de alto peso molecular y elevado grado de hidrólisis, base de co-polímeros de acrilamida y acrilatos (poliacrilamida - acrilato), en forma sólida granulado. Con una acción de pH entre 5.0 a 9.0.

- **Presentación:**  
Sólido granulado, saco de 25 o 50 kg.
- **Forma de Aplicación:**  
Solución Acuosa con concentración entre 0.05 y 0.20 %p/v (Partículas por volumen) (0.5 a 2.0 gramos/litro). La solución debe ser preparada con agua fría y tratada.
- **Dosificación:**  
0.5 hasta 1.2 ppm. en el agua de ceniza (0.5 hasta 1.2 g/m<sup>3</sup> de agua)

### **2.5.3 Tanques de preparación**

El polímero floculante es un agente de macro floculación y es agregado en las entradas de las cuatro celdas de decantación. La dosificación ideal depende de la cantidad de ceniza en el agua de ceniza. En general, durante el inicio de la operación del clarificador de agua de ceniza oriunda del lavado de gases en calderas, se usa una dosificación más elevada (1.0 hasta 1.2 ppm), una vez que el sistema está cargado de impurezas acumuladas en las calderas. Conforme la operación del sistema se estabiliza, la cantidad de producto, puede ser reducida (0.5 hasta 0.8 ppm), visando la optimización de su consumo.

#### **2.5.3.1 Preparación y adición en tanques de floculante:**

El producto es suministrado en la forma sólida, granulada, siendo necesaria su disolución en agua limpia. La solución de polímero floculante para uso, en el proceso debe ser preparada con agua a temperatura inferior a 50 C °, siendo esa agua libre de

sólidos en suspensión, ya que si se encuentran presentes en el producto disminuirá su desempeño y acarreará mayor consumo.

En Ingenios Azucareros se recomienda que en la preparación el agua sea filtrada, ablandada, condensada y fría, mejor si es de pozo. La preparación de la solución es realizada en los tanques de polímero floculante, y debe ser de la siguiente forma:

- Agregar 2,000 litros de agua limpia en cualquiera de los dos tanques (aproximadamente un tercio de la altura cilíndrica del tanque).
- Iniciar la agitación (a través de las serpentinas de aire) suave del contenido del tanque.
- Iniciar la alimentación de agua en el tanque seleccionado a través del embudo de alimentación de polímero floculante al tanque.
- Iniciar la adición de polímero floculante por el embudo de alimentación, de forma lenta y gradual, evitando la formación de grumos de producto en el interior del tanque - regular un flujo de agua que facilite la mezcla y la adición del producto.
- Terminada la adición del producto, completar el nivel de operación del tanque con agua.
- Aguardar la mezcla y disolución completa del producto, manteniéndose la agitación durante cerca de 30 minutos.
- Después de la mezcla del producto, apagar la agitación con aire.
- Antes de iniciar el bombeo del producto a través de las Bombas de Polímero, accionar la agitación por cerca de 15 minutos, para homogenizar el medio.
- Siempre se debe tener cuidado al accionar las bombas, ya que estas no pueden trabajar en vacío, por que se arruinaría el estator de la bomba.

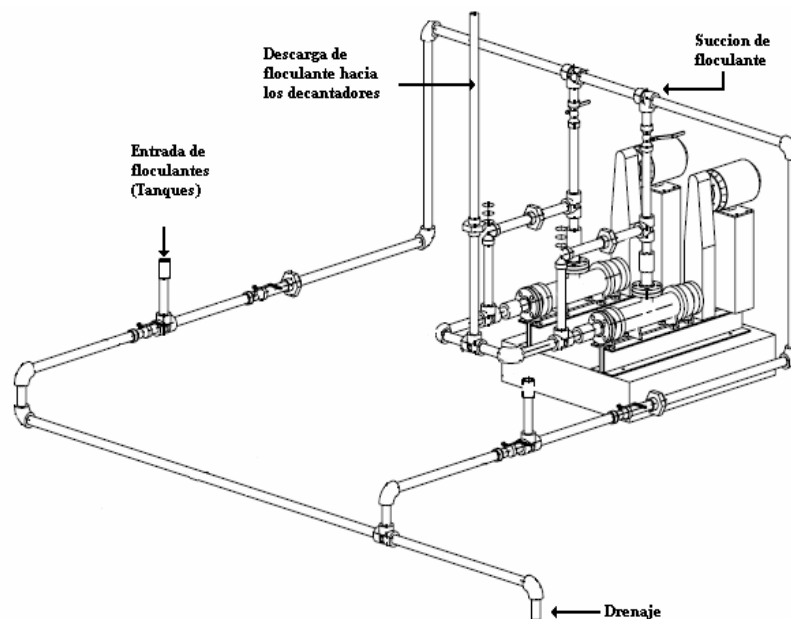
## 2.5.4 Bombas dosificadoras

Dosificación:

La adición del polímero floculante es hecha a través de las Bombas de Polímero, es una bomba rotativa volumétrica de desplazamiento positivo del tipo de tornillo. El ajuste del flujo de polímero floculante es hecho a través del ajuste manual del inversor de frecuencia de la bomba. Estas bombas llevan el floculante por medio de tuberías a las cuatro celdas decantación, los cuales están equipados con válvulas para regular el flujo de floculante en los puntos de aplicación del polímetro, para obtener un flujo regulado para las cuatro celdas de decantación. Para la operación de dosificación se debe tener en cuenta que el trabajo solo se debe hacer con una bomba, ya que el mecanismo de succión esta previsto para poder hacer el cambio de tanque y poder bombear el producto con una sola bomba.

Nota. Nunca operar las bombas en vacío, para evitar daños a la bomba, siempre dejar abiertas las válvulas de succión de las bombas.

**Figura 26. Dosificación del polímetro floculante**



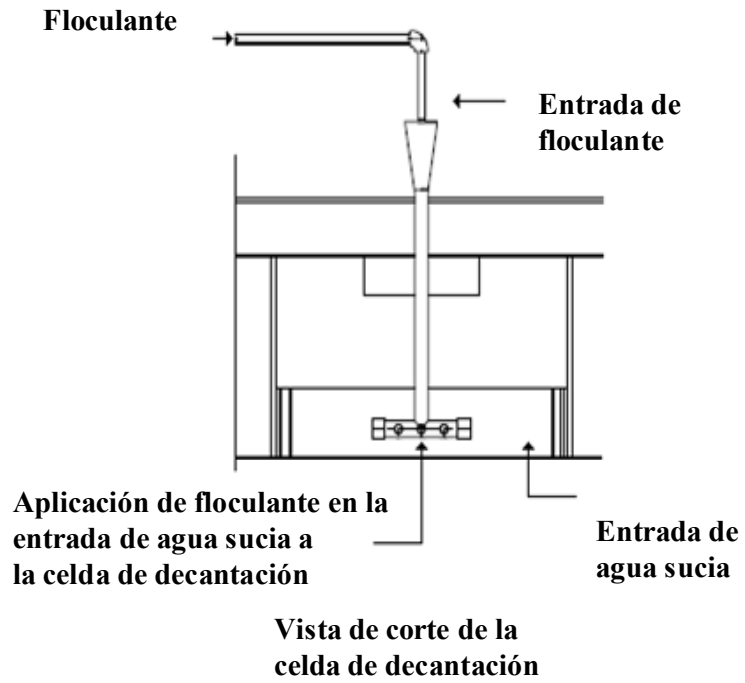
### **2.5.5 Tipo de agitador**

El tipo de agitador utilizado para la preparación del polímero floculante es básicamente una flauta o serpentín rectangular, fabricada de tubo galvanizado de 1/2", la cual esta perforada en su periferia, este serpentín esta colocado en el fondo de cada tanque de floculante. Posee 20 agujeros perforados de 3/16" de diámetro en la parte de arriba del tubo, 8 agujeros perforados de 3/16" hacia abajo del tubo, y 13 agujeros de 3/16" a 90° del tubo a favor de las manecillas del reloj. Este agitador es de tipo neumático, el aire es suministrado por medio de un compresor de tipo reciprocante y tanque pulmón. Este tipo de agitador es utilizado básicamente para el preparo de la dosificación de floculante, y debe estar en operación cada vez que se tenga que preparar el polímero por lo menos media hora de haberse diluido el floculante.

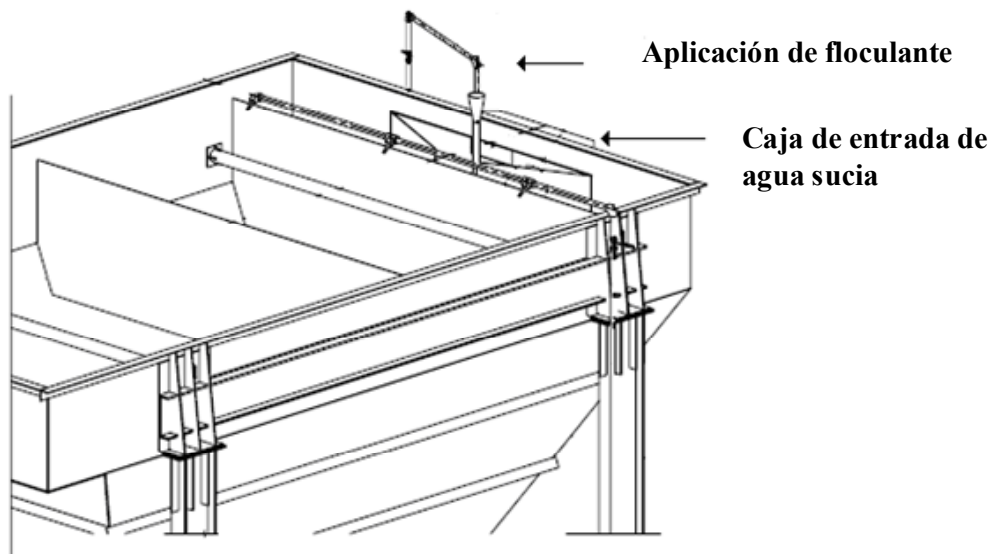
### **2.5.6 Puntos de aplicación**

El punto de aplicación de floculante es en la caja de entrada de agua de ceniza de las cuatro celdas de decantación, las bombas dosificadoras conducen el floculante hacia este punto, por gravedad cae el polímero en un recipiente cónico, y este es dispersado en la parte de abajo por una flauta que contiene tres agujeros de 7/8" de diámetro por donde sale el polímero floculante, como lo muestra la figura.27. Es aquí en este punto donde el polímero floculante es mezclado con el agua de ceniza, que es bombeada del tanque y entra por la parte de atrás y con forme entra, el flujo de agua se va aplicando el polímero y es aquí donde el polímero y el agua de ceniza se mezclan para poder lograr la floculación y luego la decantación de ceniza.

**Figura 27. Punto de aplicación del polímero**



**Figura 28. Vista superior del punto de aplicación de floculante en la celda de decantación**



## **2.6 Operación de la celda de decantación**

### **2.6.1 Regulación de entrada de agua a celdas de decantación**

Durante la operación, las válvulas de entrada de agua de ceniza en las cuatro celdas de decantación deben estar 100% abiertas para evitar abrasión. Si es notado que una de las celdas de decantación presenta un flujo superior a los demás, se debe cerrar un poco su respectiva válvula de entrada, de forma a equilibrar el flujo con las demás celdas de decantación, manteniéndose por lo menos una válvula de entrada 100% abierta. Una variación excesiva de flujo entre las celdas de decantación puede ser causada por un ajuste indebido de los vertederos. Estas válvulas se cierran únicamente cuando exista una parada muy larga, debida a algún tipo de falla, o cuando se efectuó algún mantenimiento a cualquier celda de decantación.

### **2.6.2 Formación de flóculos**

Después de la etapa de floculación de sólidos, el efluente sigue hasta las cámaras de decantación, donde los flóculos de ceniza se sedimentan en el fondo de las cuatro celdas de decantación formando el lodo, mientras el agua tratada sigue por la superficie hasta el final de las celdas de decantación, rebalsando a través de los vertederos para el tanque de agua limpia.

La forma para demostrar el proceso de floculación y formación de flóculos después de la adición del polímero floculante, que se produce en los decantadores de ceniza después de la cámara de admisión, cerca de 1 minuto los sólidos deben decantar en el fondo del tanque como se muestra en la simulación en vitrio de la figura 29.



**Figura 29. Simulación en vidrio de las varias etapas de decantación del agua de ceniza en el interior de las celdas de decantación**

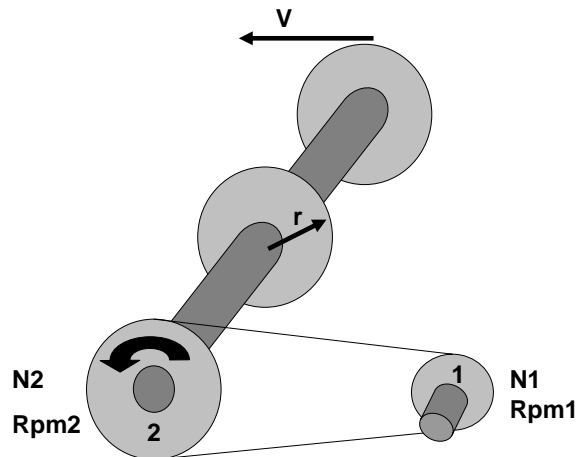


### 2.6.3 Manejo de lodos

Para el manejo de lodos, proveniente del proceso de clarificación de agua de ceniza, es necesaria la utilización de un canal abierto, este canal esta dispuesto para recibir los lodos provenientes de las celdas de decantación, por medio de la gravedad llevan el lodo hacia los conductores filtros quienes son los encargados de filtrar el liquido y conducir los lodos decantados hacia la tolva de desechos. Estos conductores utilizan transmisión por cadenas por medio de ella se trasmiten el movimiento de una rueda dentada(conductora) a otra rueda dentada (conducida), la cual esta unida al eje de los sprocket de los conductores, estos son los encargados de manejar el lodo y llevarlos hacia la tolva de desechos a una determinada velocidad, el conductor 1 y 2, tiene una velocidad de conducción de lodos de  $V = 108.78$  Pies/min., el conductor inclinado 3 ; que es el encargado de recibir el lodo de los conductores 1 y 2 y este es el que lleva los lodos hacia la tolva de desechos tiene una velocidad de conducción de  $V = 34.45$  Pies/Min.

Estas velocidades son calculadas de la siguiente manera:

**Figura 30. Diagrama de transmisión de los conductores de tablillas**



$$V = \frac{2 (\pi) (r) x (Rpm 2)}{12}$$

Donde :

$r$  = Radio de paso del sprocket de la cadena de arrastre (Rivetles 458).

Rpm = Revoluciones por minuto de los Sprokets.

$N$  = Numero de dientes de los sprokets.

Para encontrar las Rpm<sub>2</sub> se calcula de la siguiente manera:

$$Rpm_1 x N_1 = Rpm_2 x N_2$$

### Calculo de velocidad par el conductor # 1 y 2

- N1. De dientes del sprocket conductor = 19
- N2. De dientes del sprocket conducido = 19
- Rpm<sub>1</sub> del reductor = 22.11
- Radio del sprocket del conductor de ceniza en pulgadas = 10.331

Entonces con la formula descrita anterior encontramos las revoluciones por minuto del sprocket conducido  $Rpm_2 = 20.11$

Ahora con la formula de velocidad descrita anteriormente procedemos a calcular la velocidad del conductor de ceniza # 1 y 2.

$$V = \frac{2 (3.1416) (10.331) x (20.11)}{12}$$

$$V = 108.78 \text{ Pies/ Min.}$$

### **Calculo de velocidad para el conductor # 3**

- N1. De dientes del sprocket conductor = 19
- N2. De dientes del sprocket conducido = 60
- Rpm<sub>1</sub> del reductor = 22.11
- Radio del sprocket del conductor de ceniza en pulgadas = 10.331

Entonces con la formula anterior de relación de sprocket obtenemos las revoluciones por minuto del sprocket conducido  $Rpm_2 = 6.3681$

Ahora con la formula de velocidad descrita anteriormente procedemos a calcular la velocidad del conductor de ceniza # 3.

$$V = \frac{2 (3.1416) (10.331) x (6.3681)}{12}$$

$$V = 34.45 \text{ Pies/ Min.}$$

#### **2.6.4 Análisis de agua en la salida de las celdas de decantación**

Para evaluar la calidad del agua tratada se hace a través de la observación del agua rebalsada en los vertederos de cada una de las celdas de decantación. Esta agua debe ser agua limpia y transparente libre de flóculos. Esta evaluación debe hacerse cada 2 horas para ver la calidad de agua que esta saliendo por cada uno de los vertederos, después del proceso de la decantación de lodos en cada una de las celdas. Si el agua se encuentra un poco turbia hay que evaluar la calidad de la floculación a través de la observación por medio de una muestra colectada en la entrada de los decantadores, después la admisión de polímero. Debemos dejar decantar la muestra en una probeta (cilindro graduado), los sólidos deben, rápidamente, decantar en su fondo (cerca de 1 minuto). Si la dosis aplicada en la probeta no es eficiente evaluar la dosificación de polímero.

La mala clarificación del agua tratada puede ser debida a una adición insuficiente de polímero floculante causada por:

- Baja concentración de polímero en el medio - adición de cantidad insuficiente de polímero en los tanques de preparación de floculante, o mala homogeneización durante el preparo, causando la ocurrencia de muchos grumos no disueltos, reduciendo la cantidad de polímero disuelto en el medio.
- Floculante viejo - con tiempo de preparo arriba de 24 horas.
- Problemas operacionales de las bombas dosificadoras (tapamiento, paradas) o flujo insuficiente

**Figura 31. Salida de agua tratada por los vertederos de las celdas de decantación**



## **2.7 Implementación del programa de mantenimiento a equipos en el proceso de clarificado del agua**

### **2.7.1 Conceptos de mantenimiento**

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

Las estrategias convencionales de “reparar cuando se produce la avería” ya no sirve. Fueron validas en el pasado, pero se es consciente de que esperar a que se produzca la avería para intervenir, es incurrir en unos costos excesivamente elevados (pérdidas de producción, diferencias en la calidad, etc.) y por ello la empresa se planteo llevar a cabo procesos de prevención de estas averías mediante un adecuado programa de mantenimiento.

La evolución del mantenimiento se estructura en las cuatro siguientes generaciones.

**1ª generación:** Mantenimiento de averías. Se espera a que se produzca la avería para reparar.

**2ª generación:** Se empieza a realizar tareas de mantenimiento para prevenir averías. Trabajos cíclicos y repetitivos de frecuencia normal.

**3ª generación:** Se implementa el mantenimiento a condición, es decir, se realizan monitorizaciones de parámetros de los equipos utilizados en la clarificación del agua de ceniza de los cuales se efectuarán los trabajos propios de sustitución o reacondicionamiento de los elementos.

**4ª generación:** Se implantan sistemas de mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, de la organización y ejecución del mantenimiento. Se establece los grupos de mejora y seguimiento de las acciones.

### **Sistema del tipo TPM (Mantenimiento Productivo Total)**

Para que el proyecto de implementación, ajustes de programación preventiva y puesta a punto del sistema completo pueda dar buenos resultados, es necesario que el jefe de mantenimiento del ingenio se comprometa con:

- Disponibilidad de tiempo de un empleado de mantenimiento por área de trabajo (mecánica, eléctrica, otros) por lo menos (4) horas diarias mientras el proyecto está en proceso de parametrización y recolección de datos.
- Disponibilidad de por lo menos un computador de tiempo completo, donde el grupo de trabajo elegido, tanto personal interno como externo puedan acceder fácilmente con las debidas reglamentaciones que ello exige.
- Disponibilidad de tiempo de personal administrativo, involucrado con el departamento en cuestión, para el seguimiento de:
  - Cronograma
  - Asignación de cumplimiento de tareas específicas
  - Validación de datos y tareas ingresadas a la base de datos.

## **2.7.2 Tipos de mantenimiento**

En el Ingenio La Unión, por su proceso continuo de trabajo durante el periodo de zafra, se tiene en cuenta 3 tipos de mantenimiento para asegurar al mínimo las pérdidas de tiempo efectivo de producción de azúcar, además asegura el buen funcionamiento del sistema de clarificador de agua de ceniza de calderas. Los tres tipos de mantenimiento son: mantenimiento de averías, mantenimiento preventivo, y mantenimiento predictivo, los cuales se describen en los párrafos siguientes.

### **2.7.2.1 Mantenimiento de averías**

Consiste en la aplicación de programas destinados a eliminar condiciones de trabajo indeseables en el sistema de clarificador de agua de ceniza cumpliendo con los reglamentos y normas del Ingenio. Este tipo de controles al ser aplicados en el Ingenio buscan detectar equipos con problemas, teniendo el registro de funcionamiento de las maquinas en todo momento para conocer el grado y causas de los problemas para realizar inmediatamente la corrección adecuada.

### **2.7.2.2 Mantenimiento preventivo**

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



### **2.7.2.3 Mantenimiento predictivo**

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

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

### **2.7.2.4 Estructura del programa de mantenimiento**

#### **Objetivos del programa de mantenimiento.**

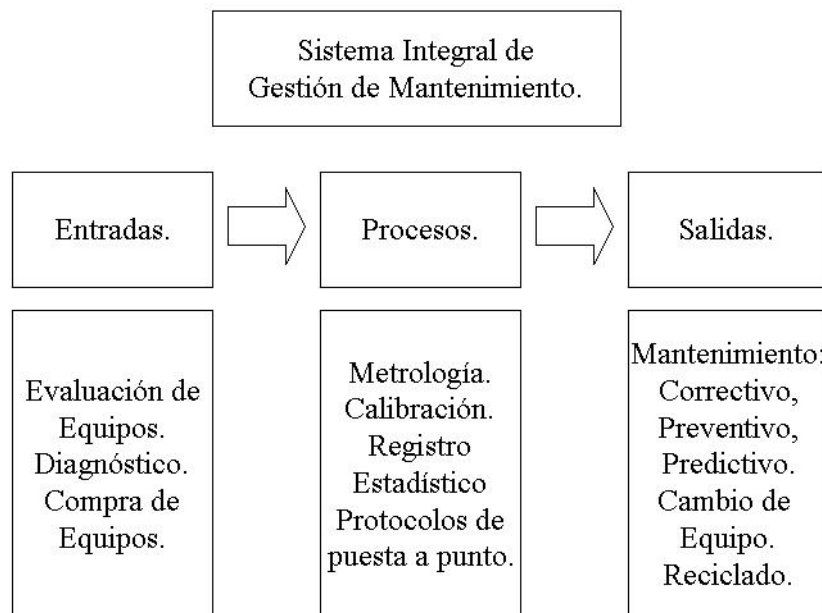
El sistema de mantenimiento busca lo siguiente:

- Prolongar la vida de los equipos que hacen parte del proceso de clarificación de agua de ceniza.
- Optimizar operaciones en el sistema de clarificación de agua de ceniza de lavado de gases de calderas en situaciones de emergencia y crisis, disminuyendo las acciones correctivas en el lugar.
- Establecer un programa de control de repuestos y equipos destinados a resolver inconvenientes de funcionamiento de los equipos que están trabajando en el proceso.

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

En la figura 31. Se puede apreciar las entradas, procesos y salidas del sistema Integral de Gestión de Mantenimiento.

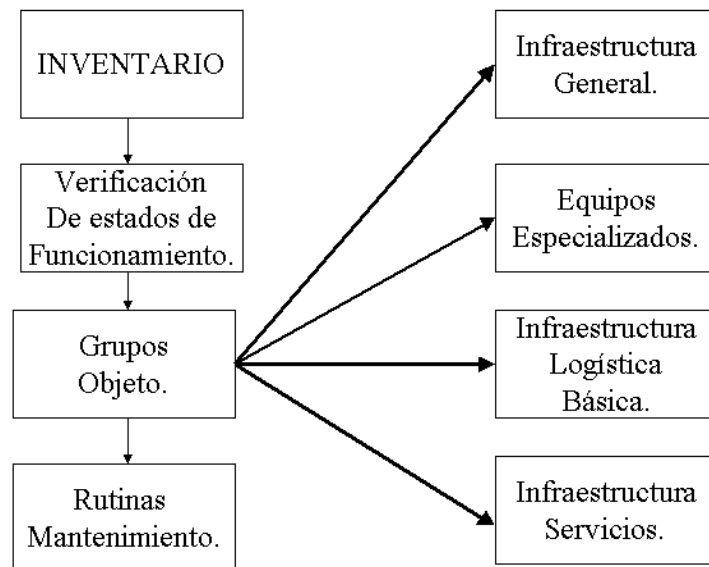
**Figura 32. Diagrama del proceso de implementación del programa de mantenimiento**



¿Qué hacer para trabajar aceptablemente en este nuevo entorno económico que exige eficiencia y eficacia en los procesos de productividad? El mantenimiento de averías, preventivo y predictivo están al orden del día. El mejoramiento continuo es una necesidad ineludible si se quiere asegurar la calidad de azúcar que se produce.

La implementación del sistema de mantenimiento se debe realizar por medio de un proceso integral de gestión de información.

**Figura 33. Diagrama del proceso de seguimiento del programa de mantenimiento**



El procedimiento para establecer el programa de mantenimiento debe regirse por los siguientes pasos.

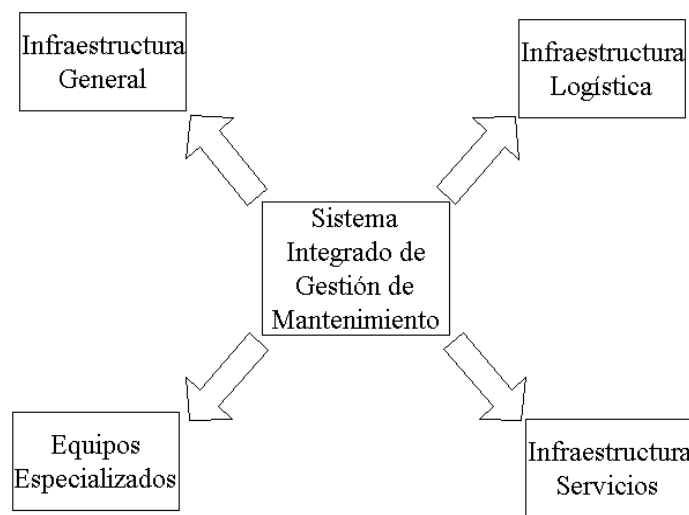
- Para que el programa de mantenimiento sea lo suficientemente efectivo, se necesita realizar un adecuado diagnóstico y evaluación de la capacidad económica y tecnológica del ingenio. Tal evaluación tiene las siguientes componentes: inventarios actualizados de equipos, estado de funcionamiento, grado de obsolescencia de equipos, historial de

mantenimiento y funcionamiento, metodologías y sistemas de almacenamiento y transporte, historial operativo y de capacitación del personal que ha utilizado el equipo, sistemas de control y seguimiento del uso, manejo y mantenimiento de los equipos que forman parte de las diferentes redes logísticas de la institución.

- Establecimiento de un compromiso para suministros con los proveedores para facilitar la obtención de repuestos y servicios de mantenimiento. Este compromiso busca garantizar repuestos y servicios de mantenimiento para los equipos del ingenio. Los proveedores de equipos utilizados en el ingenio deben cumplir con las siguientes requisiciones para cumplir con la eficiencia de entrega de equipos: tener respaldo y cubrimiento nacional e internacional, además de tener respaldo de los productos que vende.
- Implementación de un sistema de calidad como acción preventiva en la utilización de los diferentes equipos utilizados en los procesos que hacen parte del ingenio. Se deben documentar y clasificar los equipos en relación con el proceso donde trabajan, programas de capacitación en uso, manejo y mantenimiento de equipos, control de reservas de repuestos para el reemplazo de equipos que ya han cumplido su vida útil.
- Para completar y garantizar el éxito de la implementación del programa, se deben desarrollar un plan de capacitación continua, el cual busca fortalecer los equipos adquiridos, reevaluar y replantear las metodologías de mantenimiento preventivo utilizadas actualmente para la ejecución del programa y normalizar los diferentes procesos de mantenimiento.

En la siguiente figura se puede apreciar las áreas de acción del sistema de mantenimiento.

**Figura 34. Diagrama de las áreas de acción del programa de mantenimiento**



Finalmente se deben mantener un sistema de control, seguimiento, evaluación y retroalimentación constante, el cual se realizara periódicamente.

Para el éxito en el desarrollo del programa de mantenimiento, el ingenio debe ponerse a disposición los siguientes recursos:

- Sistemas de información para el control y seguimiento sistematizado de las diferentes actividades del programa de mantenimiento de averías, preventivo y predictivo.
- Personal con experiencia en el uso, manejo y mantenimiento de equipos.

### **Control del proceso de sistemas de mantenimiento:**

Se deben identificar y planificar los procesos de mantenimiento y se debe asegurar que estos procesos se ejecuten de manera controlada, estas condiciones controladas deben incluir lo siguiente:

- Procedimientos documentados que definen la forma de mantenimiento.
- Uso de equipos adecuados y ambientes adecuados para operaciones de mantenimiento.
- Conformidad con las normas, códigos de referencia, planes de calidad y procedimientos documentados de mantenimiento preventivo.
- Monitoreo y control de parámetros (Variable de funcionamiento del sistema de clarificación de agua) adecuados para los procesos que integran el programa de mantenimiento.

Cuando los resultados del mantenimiento no se pueden verificar plenamente por inspección y ensayo posterior y, cuando, las deficiencias en el equipo se encuentra en uso, el mantenimiento debe ser realizado por operadores especializados o necesitará seguimiento y control continuo para asegurar que el mantenimiento cumpla con los parámetros especificados.

Sea cual fuere el tipo de mantenimiento a aplicar, se deben establecer y mantener actualizados procedimientos para aplicar acciones correctivas y preventivas en mantenimiento.

Cualquier acción correctiva o preventiva que se tome debe ser de un grado adecuado que garantice la completa funcionalidad de los equipos durante las operaciones de emergencia.

Se deben aplicar y registrar cualquier cambio a los procedimientos documentados, resultantes del mantenimiento de averías y preventivos. Los documentos de control juegan un papel importante en el proceso de funcionamiento del programa de mantenimiento, por ello debemos establecer documentos que permitan verificar el seguimiento del programa.

### **Hoja de vida de los equipos**

La hoja de vida de los equipos garantizará un adecuado inventario de los diferentes elementos, lo cual facilitará el manejo de los mismos y su mantenimiento. Como podemos ver un ejemplo del tipo general de las hojas de control de vida que hay en el ingenio para los equipos hidráulicos que trabajan en el proceso.

Toda hoja de vida de equipos para control de mantenimiento tiene la siguiente información.

- Nombre del equipo, marca, color y serie.
- Fecha de recepción del equipo, condiciones de funcionamiento.
- Componentes del equipo.
- Usos de equipo.
- Combustibles o aceites que se necesitan para el funcionamiento.
- Listados de repuestos y proveedores.
- Duración de las garantías.
- Precauciones en su utilización
- Historial operativo de emergencias.
- Personal especializado en su utilización.
- Historial de traslados.
- Historial de mantenimiento.

- Procedimiento para puesta a punto.
- Fechas de limpieza, inspección visual y reemplazo de piezas defectuosas.
- Fechas de cambio de aceites y combustibles.
- Personas responsables del mantenimiento y operación del equipo.

### **2.7.3 Mantenimiento en época de zafra**

#### **2.7.3.1 Inspección por turnos**

Para mantener un control preventivo de las condiciones de los equipos utilizados en la clarificación de agua de ceniza de calderas con los que cuenta el proceso, se establece inspecciones por turno. Estas inspecciones brindan una información que será de mucho valor para prevenir defectos en los equipos durante la zafra, mejorando la ejecución de los trabajos en las paradas programadas. La inspección debe realizarse, como mínimo, una tres veces por turno y la misma la realizará el mecánico encargado del turno. Es importante que los que hagan esta inspección tengan los conocimientos necesarios para detectar cualquier falla o anomalía en el funcionamiento de los equipos. Todas las fallas que se encuentren en los equipos deberán ser anotadas y reportadas por escrito al encargado del departamento de mantenimiento.

#### **2.7.3.2 Control de repuestos básicos y crítico**

Se les denomina repuestos críticos y básicos los destinados a sustituir aquellas piezas cuyo desgaste afecta o paralice el proceso de clarificación de agua de ceniza proveniente de los lavadores de gases de calderas.



Dadas las características del ingenio azucarero, donde no existe doble línea de producción o doble equipamiento para sustituir por defecto, los repuestos críticos y básicos juegan un papel decisivo en el mantenimiento y reducen considerablemente el tiempo perdido de la zafra por defecto de los equipos.

Entre los principales repuestos podemos mencionar:

- Motores Eléctricos.
- Cojinetes de las bombas.
- Estator de las bombas dosificadoras.
- Sprocket de Conductores de Ceniza.
- Válvulas de Mariposa.
- Válvulas de Bola.

## **2.7.4 Mantenimiento en épocas de no zafra**

### **2.7.4.1 Inspección**

Siempre después de finalizada la zafra se deben de inspeccionar todos los equipos involucrados en la clarificación de agua de ceniza, para verificar el estado en que se encuentran. Durante el desarrollo de las reparaciones realizadas, se mantendrá una revisión diaria y semanal del avance de los trabajos y de sus problemas, para tomar con tiempo las medidas que garanticen que se pueda completar en tiempo y forma los trabajos de reparación.

Además de que toda la información recopilada de los trabajos de reparación, serán documentados para tener un historial que permita una retroalimentación de las reparaciones siguientes.

#### **2.7.4.2 Sistema de control de la reparación**

El sistema que existe brinda el control del avance de las reparaciones de los equipos involucrados en la clarificación de ceniza. De esta manera se tiene antemano, diariamente como semanalmente los porcentajes de avance físico de las reparaciones realizadas, obteniendo resultados como:

- Porcentaje de ejecución planificada y real de la reparación de los equipos del clarificador de ceniza.
- Porcentaje de utilización del tiempo planificado en horas-hombre.
- Porcentaje de cumplimiento de lo planificado para cada uno de los equipos utilizados en el proceso.
- Control de personal a cargo de los trabajos de reparación, específicamente si fueron parados, fueron trasladados a otros equipos o si se encuentran atrasados.

El sistema brinda la información detallada del proceso de reparación al jefe inmediato.

#### **2.7.4.3 Constancia de calidad de reparación**

La constancia de calidad no es más que la documentación recopilada de la reparación en los equipos en el periodo de mantenimiento, permitiendo obtener los datos necesarios para saber el estado de los equipos.

Esta constancia de calidad tiene como objetivo principal:

- Sirve como una orden de trabajo de reparación ya que debe ser llenado antes de comenzar las reparaciones entregándoselas al mecánico

encargado o responsable de la reparación del equipo, con los detalles de los trabajos o trabajo que debe realizar.

- El mecánico responsable del trabajo, garantiza mediante la documentación, las condiciones en las que ha quedado el equipo, los trabajos realmente afectados y los problemas que pueda presentar el equipo en el futuro, de acuerdo con la reparación efectuada.
- Una vez el jefe inmediato tenga los documentos, podrá clasificar los equipos que han quedado deficientes para darles prioridad en la medida que se resuelvan los problemas de material, o de otra índole.



## CONCLUSIONES

1. Para el análisis de operación y funcionamiento del clarificador de agua de ceniza de lavado de gases de calderas, indicó que la eficiencia y el rendimiento de dicho equipo han mejorado en un 90% con relación al clarificador anterior, al utilizar las celdas de decantación, esta nueva tecnología implementada en la empresa, permitió mejorar la eficiencia en el clarificado del agua de ceniza proveniente de el lavado de gases de calderas, permitiendo recircular agua limpia hacia los lavadores de gases (Scrubbers), logrando obtener una mejor eficiencia en el lavado de gases, obteniendo gases limpios en la salida de las chimeneas de las calderas, reduciendo la contaminación en un 90 %.
2. Los análisis de operación y funcionamiento de equipos, son una de las partes importantes del sistema operativo, y es un documento que debe reflejar con exactitud la operación que describe, quién es el responsable de las actividades, y cuáles son los registros que surgen de dichas actividades. Los procedimientos de operación son una guía práctica que permite seguir una secuencia lógica para optimizar el arranque, parada y operación normal del clarificador.
3. Al establecer el programa de mantenimiento, se proporcionó una herramienta de análisis y control que permite documentar las condiciones de funcionamiento de los equipo del clarificador de agua de ceniza, así como para mantener sus rendimientos en los valores máximos, minimizando reparaciones inesperadas o no programadas y evitando pérdidas de equipos por la poca información de las operaciones que estos equipos proporcionan al personal de mantenimiento. Por ser un programa establecido para obtener resultados a largo plazo, de estos resultados se obtendrá un comparativo de la vida efectiva de trabajo de los equipos, y la vida útil para la cual fueron diseñados por los fabricantes.



## RECOMENDACIONES

### - Al jefe de Mantenimiento.

1. Capacitar al personal a cargo del mantenimiento, sobre información técnica de los equipos que forman el proceso, para asegurar que el mantenimiento que se les da, cumpla con los requisitos mínimos establecidos por los fabricantes.
2. Crear un programa de capacitación bien orientado, para que el personal que opera en el clarificador de agua de ceniza, adquiera las bases técnicas para optimizar el funcionamiento de los equipos.

### - Al operario.

3. Hacer inspecciones cada hora, para observar el estado de operación en cada una de las celdas de decantación, verificando cómo está saliendo el agua en cada una de ellas, después del proceso de clarificación.
4. Verificar el flujo de floculante en el punto de aplicación, porque una adición de polímetro floculante insuficiente, producirá una agua mal clarificada.
5. Observar el flujo de lodos drenado por las celdas de decantación; en ningún momento debe existir taponamiento en la salida de lodos en cada una de ellas, si eso llegara a darse, se producirá una acumulación en la celda de decantación y ocurrirá una contaminación con el agua clarificada.





## BIBLIOGRAFÍA

1. Melgar Samayoa, Ennio Hugo. Eficiencia de calderas acuotubulares del Ingenio La Unión S.A. Tesis Ing. Mec. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1994. 101 pp.
2. Severns W.H. **Energía mediante vapor, aire o gas**. México, Editorial Reverte. 1982. 237 pp.
3. Cleaver Brooks. **Calderas pirotubulares**, modemo C.B.Estados Unidos: 159 pp.
4. Baumeister, Theodore. **Manual de Ingeniero mecánico**, 8ª. Edición, México, Editorial McGraw-Hill, 1992.Cap. 9
5. Spencer- Meade. **Manual del azúcar de caña**. S.I. España, Editorial Monterrey y Simón. S.A. 800 pp.
6. Zubicaray, Manual V. **Bombas, teoría, diseño y aplicaciones**. 2ª. Edición, México, Editorial Noriega-Limusa, S.A. 175 pp.
7. Frank N. Kemmer, John McCallion. **Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones**. México, Editorial McGraw-Hill, 1989.Tomo I Cap. 8 y 9.

8. ENGENHO NOVO Tecnologia Ltda. **Manual de proceso, tratamiento de agua de ceniza.** Rio de Janeiro/ RJ, Brasil. 18 pp.
9. H.Perry, Robert – Cecil H. Chilton. Chemical Engineers`Handbook. 5ª. Edición. McGraw Hill.1990. 20-86 pp.
- 10.Katz.P.E. Jacobo, **The Art of Electrostatic Precipitation.** 3ª edition 1989. Impreso en USA. 54-66 pp.
- 11.Pope, J. Edward. **Soluciones prácticas para el ingeniero mecánico.** México, Editorial Interamericana Mc.Graw-Hill, 2000. 405 pp.
- 12.<http://dsostenible.com.ar/tecnologias/flot00.html>. **Coagulación y floculación.** Desarrollo sostenible. 5-6 pp.
- 13.<http://yosemite.epa.gov>. **U.S.: 412 C Wet Scrubbers plan review.** **U.S. Environmental Protection Agency.** Lesson 1 to 11.
- 14.<http://virtual.unal.edu>. **Proceso de tratamiento de aguas.** Universidad Nacional de Colombia. Cap. 7.

# **ANEXOS**



## ANEXOS

### Diagrama de flujo completo del proceso de clarificación de agua de ceniza de lavado de gases de calderas

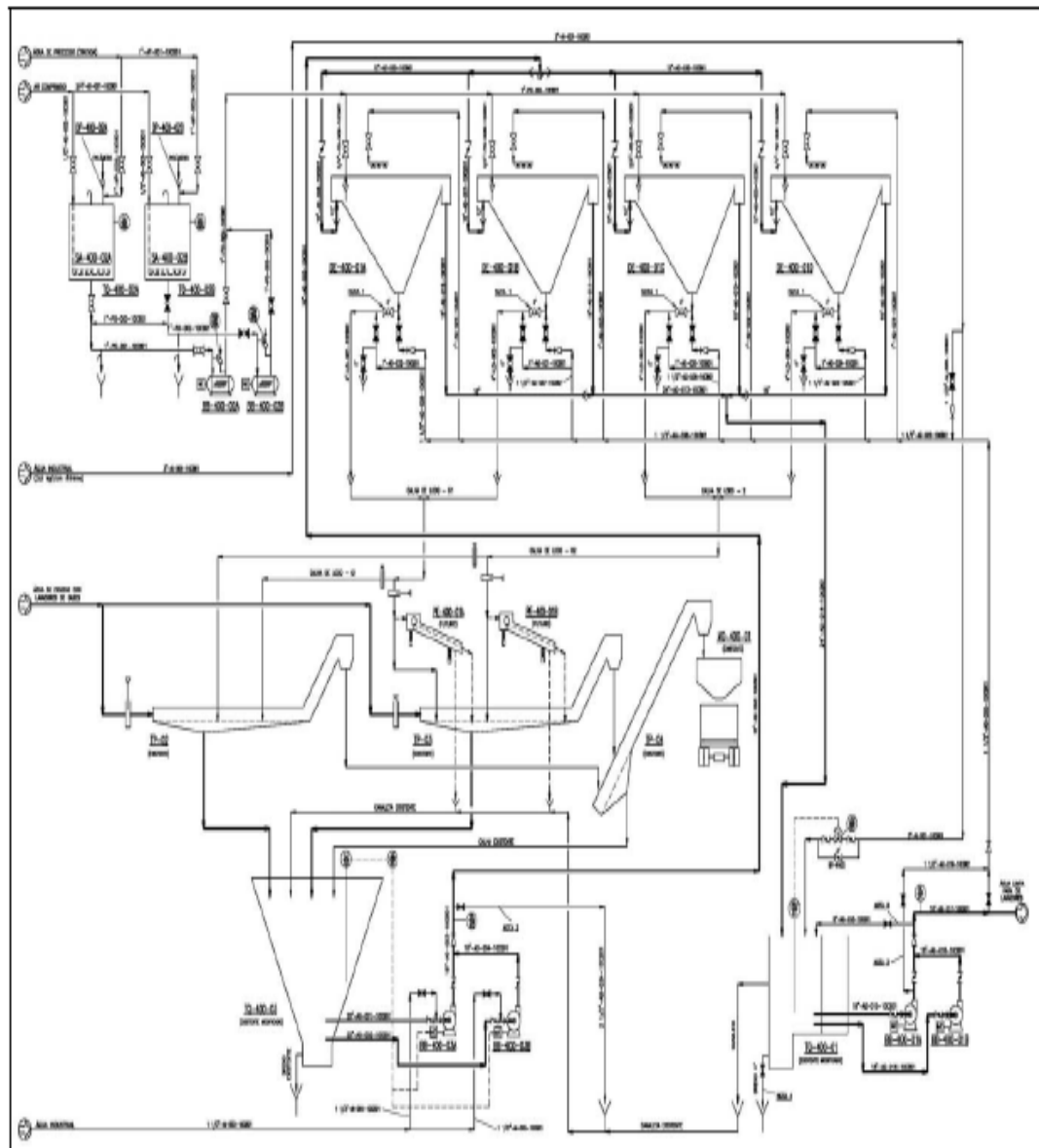




Figura 35. Simbología del diagrama de flujo

