



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

**ESTUDIO AMBIENTAL, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN
PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA**

Henry Jeovany Saravia Morales

Asesorado por el Ing. Ludin Giovanni Recinos Recinos

Guatemala, Julio de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO AMBIENTAL, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN
PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

HENRY JEOVANY SARAVIA MORALES

ASESORADO POR EL INGENIERO LUDIN GIOVANNI RECINOS RECINOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Orozco Godínez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

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:

**ESTUDIO AMBIENTAL, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN
PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la carrera de Ingeniería Eléctrica, con fecha 25 de octubre de 2006.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized initials and a surname, enclosed within a circular scribble.

Henry Jeovany Saravia Morales

AGRADECIMIENTOS A:

- DIOS** Por darme la vida, bendecirme y por haberme permitido llegar hasta esta meta.
- MIS PADRES** Benjamín Saravia y Domitila de Saravia, por iluminarme la vida con sus sabios consejos y por todo su apoyo brindado incondicionalmente. Sin su ayuda nunca hubiera alcanzado esta meta.
- MI ESPOSA** Por su paciencia, apoyo y comprensión.
- MI HIJO** Bendición de Dios y fuente de inspiración para continuar cosechando éxitos
- ASESOR** Ingeniero Ludin Recinos, por su ayuda y orientación durante el desarrollo de este trabajo de graduación.
- A TODOS** Los que de alguna u otra forma han formado parte de mi vida estudiantil, como practicante y laboralmente. Mil gracias a todos los que sin querer deje sin mencionar por motivos de espacio.

Guatemala, 02 de Abril de 2008

Ingeniero
Otto Andrino González
Coordinador del Área de Electrotecnia
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC

Estimado Ingeniero Andrino:

De acuerdo con la designación hecha por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he tenido a bien asesorar el Trabajo de Graduación titulado: **Estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de Precipitadores Electrostáticos en planta de generación Arizona**, desarrollado por el estudiante HENRY JEOVANY SARAVIA MORALES, carné 2000-10589 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo remitiéndole a esa Coordinación para el tramite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Ludin Giovanni Recinos Recinos.
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, 29 de MAYO 2008.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería USAC.

Señor Director,

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
Estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y
aprovechamiento de Precipitadores Electrostáticos en planta de
generación Arizona, del estudiante: HENRY JEOVANY
SARAVIA MORALES, por considerar que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS




Ing. Otto Fernando Andriano González
Coordinador Área de Electrotécnica

OFAG/sro

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: HENRY JEOVANY SARAVIA MORALES, titulado: Estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de Precipitadores Electrostáticos en planta de generación Arizona, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Espinosa Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 04 DE JUNIO 2,008.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.229.08

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO AMBIENTAL TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS, EN PLANTA DE GENERACIÓN ARIZONA**, presentado por el estudiante universitario **Henry Jeovany Saravia Morales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, julio de 2008

/cc

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII

1 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	1
1.1 Principios básicos de operación interna del precipitador electrostático.....	2
1.2 Tipos de precipitadores electrostáticos	3
1.2.1 Precipitadores electrostáticos en húmedo tipo placa-electrodo	3
1.2.1.1 Funcionamiento básico	4
1.2.1.2 Reducciones de emisiones alcanzadas	4
1.2.1.3 Aplicaciones industriales típicas	5
1.2.1.4 Ventajas.....	5
1.2.1.5 Desventajas	6
1.2.2 Precipitadores electrostáticos en húmedo tipo tubo-electrodo.....	6
1.2.2.1 Funcionamiento básico	7
1.2.2.2 Reducciones de emisiones alcanzadas	7
1.2.2.3 Aplicaciones industriales típicas	8
1.2.2.4 Ventajas.....	8
1.2.2.5 Desventajas	9

1.2.3	Precipitadores electrostáticos en seco tipo placa-electrodo	10
1.2.3.1	Funcionamiento básico.....	10
1.2.3.2	Reducciones de emisiones alcanzadas	10
1.2.3.4	Aplicaciones industriales típicas	11
1.2.3.4	Ventajas.....	11
1.2.3.5	Desventajas.....	12
1.2.4	Precipitadores electrostáticos en seco tipo tubo-electrodo.....	13
1.2.4.1	Funcionamiento básico.....	13
1.2.4.2	Reducciones de emisiones alcanzadas	13
1.2.4.3	Aplicaciones industriales típicas	14
1.2.4.4	Ventajas.....	14
1.2.4.5	Desventajas.....	15
1.2.5	Precipitadores electrostáticos de placa plana	16
1.2.6	Precipitadores electrostáticos tubulares	17
1.2.7	Precipitadores electrostáticos de dos etapas.....	18
1.3	Equipo auxiliar	19
1.4	Teoría de la precipitación electrostática.....	22
1.4.1	Punto de Operación Eléctrico.....	22
1.4.2	Proceso de cargado de partículas	27
1.4.3	Recolección de la partícula	30
1.4.4	Escabullimiento y re-encauzamiento por golpeteo	33
2	ESTUDIO AMBIENTAL	37
2.1	Normativa Ambiental utilizada para el control de emisiones en plantas termoeléctricas.....	37

2.2 Mediciones de emisiones en generadores de motores de combustión interna generando con combustible Bunker y combustible Orimulsión sin utilizar precipitadores electrostáticos.	40
2.3 Mediciones de emisiones en generadores de motores de combustión interna generando con combustible Bunker y combustible Orimulsión, utilizando precipitadores electrostáticos.	42
2.4 Comparación de las emisiones de material particulado obtenidas al no utilizar PE's y al haber utilizado PE's	43
2.5 Evaluación de impacto ambiental.....	44
2.5.1 Calidad del aire ambiental externo a planta Termoeléctrica Arizona.....	44
3 ESTUDIO TÉCNICO	47
3.1 Descripción general del proceso de control de emisiones	47
3.2 Construcción del precipitador electrostático.....	49
3.2.1 Carcasa	49
3.2.2 Aisladores de apoyo	50
3.2.3 Limpieza con aire caliente	51
3.2.4 Placas de distribución de gas de entrada y salida.....	52
3.2.5 Sistema emisor de chispas.....	54
3.2.6 Electrodo emisor	55
3.2.7 Golpeteo del sistema de descarga	56
3.2.8 Accionamiento del aparato de golpeteo del sistema emisor	57
3.2.9 Sistema colector	58
3.2.10 Mecanismo de golpeteo del colector de polvo.....	59
3.2.11 Calentamiento de tolvas inferiores.....	61
3.2.12 Sistemas rociadores.....	61

3.2.13 Sistema de transporte de polvo.....	62
3.2.14 Silo y sistema de descarga de polvo.....	63
3.3 Datos técnicos del precipitador electrostático.....	63
3.3.1 Especificación de partes del precipitador electrostático.....	65
3.3.2 Especificación de partes del sistema de control.....	66
3.4 Descripción de contenido y monitoreo del precipitador electrostático.....	66
3.4.1 Generalidades del control del precipitador electrostático.....	69
3.4.2 Unidades de TR.....	71
3.4.2.1 Puesta en marcha.....	72
3.4.2.2 Parada.....	73
3.4.2.3 Enclavamientos a otros dispositivos.....	74
3.4.3 Mecanismos de golpeteo.....	74
3.4.3.1 Puesta en marcha y parada.....	75
3.4.3.2 Enclavamientos a otros dispositivos.....	77
3.4.4 Calentadores del aislador de PE's 1-10.....	78
3.4.4.1 Puesta en marcha y parada.....	79
3.4.4.2 Enclavamientos a otros dispositivos.....	79
3.4.5 Calentadores de la tolva inferior PE's 1-10.....	79
3.4.5.1 Puesta en marcha.....	81
3.4.5.2 Parada.....	81
3.4.5.2 Enclavamiento a otros dispositivos.....	81
3.4.6 Ventiladores de limpieza por aire caliente y unidades calefactoras del 1-10.....	82
3.4.6.1 Arranque.....	84
3.4.6.2 Parada.....	85
3.4.6.3 Enclavamientos a otros dispositivos.....	85
3.4.7 Limpieza por aire para el ventilador de cajas de sello y unidad calefactora.....	85
3.4.7.1 Puesta en marcha.....	87

3.4.7.2 Parada.....	87
3.4.7.3 Enclavamientos a otros dispositivos	88
3.4.8 Transportadores de tornillo del 1-10.....	88
3.4.8.1 Puesta en marcha.....	89
3.4.8.2 Parada.....	90
3.4.8.3 Enclavamientos a otros dispositivos	90
3.4.9 Válvulas de compuerta deslizante de 1-10.....	90
3.4.9.1 Válvula abierta	91
3.4.9.2 Válvula cerrada	92
3.4.9.3 Enclavamientos a otros dispositivos	92
3.5 Instrucciones para la operación normal.....	93
3.5.1 Parámetros críticos de operación	93
3.6 Instrucciones para la puesta en marcha.....	94
3.6.1 Puesta en marcha luego de una parada de larga duracion.....	94
3.6.2 Puesta en marcha luego de una parada normal	95
3.7 Instrucciones de parada	96
3.7.1 Medidas a tomar antes de la parada	96
3.7.2 Verificaciones de respaldo	97
3.7.3 Ajustes del rectificador	98
3.8 Transtornos de funcionamiento.....	98
3.8.1 Derterminación de lecturas	98
3.8.2 Desviaciones en los medidores.....	99
3.9 Guía de mantenimiento predictivo del precipitador electrostático	102
3.9.1 Inspecciones a realizar para detectar posibles fallas o averias.....	103
3.9.1.1 Carcasa del precipitador.....	103
3.9.1.2 Compartimientos de los aisladores	103
3.9.1.3 Limpieza con aire caliente	103
3.9.1.4 Placa de distribucion de gas	104

3.9.1.5 Sistema de electrodos emisores.....	104
3.9.1.6 Sistema de electrodos colectores de polvo.....	104
3.9.1.7 Accionamiento del golpeteo.....	105
3.9.1.8 Sistema rociador.....	105
3.9.1.9 Rectificador de alta tensión.....	106
3.9.1.10 Sistema de bajo voltaje.....	106
4 ESTUDIO ECÓNOMICO.....	107
4.1 Beneficios obtenidos por operación de los PE's utilizando las unidades generadoras Orimulsión.....	108
4.2 Beneficios obtenidos por operación de los PE's utilizando las unidades generadoras Bunker.....	109
4.3 Relación beneficio costo de los PE's utilizando las unidades generadoras Bunker.....	109
4.4 Relación beneficio costo de los PE's utilizando las unidades generadoras Orimulsión.....	110
4.5 Tiempo de recuperación de capital.....	110
4.6 Aprovechamiento de la utilización de PE's en plantas generadoras con base de combustibles fósiles.....	111
CONCLUSIONES.....	113
RECOMENDACIONES.....	115
BIBLIOGRAFÍA.....	117
APÉNDICES.....	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Diámetro de partículas y rango de colección de un PE.....	1
2. Vista superior del funcionamiento de un precipitador electrostático.....	3
3. Dispositivo de control y equipo auxiliar típico	19
4. Comparación de emisiones de material particulado.....	43
5. Evaluación comparativa de estaciones monitoreadas y límites establecidos por la OMS, el BM y USEPA.....	45
6. Descripción general del proceso de control de emisiones	47
7. Carcasa del precipitador electrostático.....	50
8. Aisladores de apoyo	51
9. Limpieza con aire caliente	52
10. Placas de distribución de entrada y salida.....	53
11. Sistema emisor de chispas.....	55
12. Electrodo emisor	56
13. Golpeteo del sistema de descarga	57
14. Accionamiento del aparato de golpeteo del sistema emisor	58
15. Placa colectora con electrodo Multipeak	59
16. Mecanismo de golpeteo del colector de polvo.....	60
17. Calefacción de tolvas inferiores.....	61
18. Sistema de transporte de polvo	62
19. Desviaciones en los medidores	101

TABLAS

I. Calidad ambiental del aire en centrales termoeléctricas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	40
II. Emisiones de las unidades generando con Bunker (HFO) y sin usar PE's	41
III. Emisiones de las unidades generando con Orimulsión y sin usar PE's	41
IV. Emisiones de las unidades generando, utilizando Bunker (HFO) y PE's.....	42
V. Emisiones de las unidades generando, utilizando Orimulsión y PE's	42
VI. Mediciones de estaciones monitoreadas para planta Arizona.....	44
VII. Datos del sistema de precipitadores electrostáticos.....	63
VIII. Despliegue de unidades de TR en la RTU	71
IX. Despliegue de los mecanismos de golpeteo en el sistema emisor en la RTU.....	75
X. Despliegue de los mecanismos de golpeteo en el sistema colector en la RTU.....	76
XI. Despliegue de calentadores de aislador en la RTU.....	78
XII. Despliegue calentadores de tolva inferior en la RTU.....	80
XIII. Despliegue de ventiladores de limpieza y unidades calefactoras en la RTU.....	83
XIV. Despliegue de la limpieza por aire para ventilador y unidad calefactora de las cajas de sello en la RTU.....	86
XV. Despliegue de transportadores de tornillo en la RTU	89
XVI. Despliegue de válvulas de compuertas deslizante en la RTU.....	91
XVII. Costos de inversión de capital para el sistema de PE's	107
XVIII. Costos anuales para el sistema de PE's	108
XIX. Ceniza recolectada con la orimulsion	108
XX. Ceniza recolectada con el bunker.....	109

LISTA DE SÍMBOLOS

PE	Precipitador electrostático
µm	Micras de metro
V	Voltio
O₂	Dióxido de Oxígeno
kPa	Kilo pascales
°C	Temperatura en grados Celsius
Acfm	Actual cubic feet minutes (pies cúbicos por minutos actuales)
DMM's	Diámetros medios máxicos
Pies/min	Pies por minuto
A/m²	Amperio por metro cuadrado
m²/V·s	Metros cuadrados sobre voltio por segundo
F/m	Faradio por metro
M	Metro
°K	Temperatura en grados Kelvin
atm	Atmósferas de presión
V/m	Voltio por metro
Ohm·m	Ohmio por metro
C	Coulombs
j/°K	Joules por grado Kelvin
No./m³	Número de iones por metro cúbico
S	Tiempo en segundos
N	Newton
m/s	Metro por segundo
Kg/m·s	Kilogramos metro por segundo
m³/s	Metro cúbico por segundo
m²	Metro cuadrado
s/m	Segundos por metro

mg/N·m³	Miligramos sobre Newton por metro cúbico
Mwe	Mega watts efectivos
µg/m³	Micro gramos por metro cúbico
Nox	Óxidos de Nitrógeno
EA	Evaluador ambiental
OMS	Organización mundial para la Salud
BM	Banco mundial
USEPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Ambiente)

GLOSARIO

PM₁₀	Concentración de partículas en suspensión menor a 10 micrones en diámetro, medido un período de 24 horas.
PST	Concentración de partículas totales en suspensión, medidas en un período de 24 horas.
NO₂	Concentración de óxidos de nitrógeno, medidos en un período de 24 horas.
SO₂	Concentración de dióxidos de azufre, medidos en un período de 24 horas.
pH	Potencial de hidrógeno.
PSD	Concentración de partículas sedimentables, medidas en un período de 24 horas.
ESCABULLIMIENTO	Es cuando corrientes de gas cargadas de partículas que fluyen a través de regiones que no están electrificadas, no estarán sujetas a las fuerzas de recolección y tienden a pasar a través del PE sin ser recolectadas.
REENCAUZAMIENTO	Es la cantidad de polvo asociado con la recolección del PE, en el cual las partículas de polvo son barridas de vuelta hacia la corriente circulante del gas, por tal motivo solamente algo de polvo pudiera ser recolectado.

RESUMEN

Los conceptos de teoría electromagnética que se estudian en la carrera universitaria de la Ingeniería Eléctrica, son aplicables a una diversa gama de equipos y dispositivos eléctricos.

Por tal motivo, el primer capítulo de este trabajo describe el principio básico de operación de los precipitadores electrostáticos (PE's), además incluye los tipos de PE's que se utilizan actualmente, dando a conocer en qué tipo de industrias son aplicables y resaltando su principales ventajas y desventajas; para dejar una base sólida de la aplicación de los conceptos adquiridos en el curso de teoría electromagnética se ha desarrollado en este primer capítulo una variedad de ecuaciones eléctricas en las cuales paso a paso se encuentra la razón fundamental del funcionamiento interno de los PE's.

Luego de conocer la operación y tipos de PE's, ventajas y desventajas, aplicaciones y razonamientos eléctricos internos de los PE's, se continua con la elaboración de un estudio ambiental por medio del cual se da a conocer la importancia de la utilización de PE's en plantas de generación de energía eléctrica operadas por motores de combustión interna, este segundo capítulo se basa en datos recopilados de la generación de electricidad en planta Arizona, utilizando esta combustible bunker(actualmente) y utilizando combustible orimulsión(anteriormente), debido a que las normativas ambientales los exigen cuando la contaminación por la combustión interna excede los límites establecidos y para mantener una adecuada conservación del medio ambiente.

El tercer capítulo es un estudio técnico por medio del cual se describen datos específicos de los PE's que se encuentran instalados en planta Arizona, operaciones y mantenimientos que deben de realizarse a los PE's antes y después de haber estado en servicio, como así también se establecerán posibles fallas que puedan ocurrir, como detectarlas y como deben de ser reparadas.

En el cuarto capítulo se realiza un estudio económico, por medio del cual se obtiene la comparación de costos y beneficios, de operación y de mantenimiento de la utilización de los PE's en planta Arizona utilizando para la combustión interna el bunker (actual) y la orimulsión (anterior), para las cuales se desarrollan las relaciones de beneficios y de costos, para determinar el aprovechamiento de utilizar PE's en la generación de energía eléctrica derivada de los combustibles fósiles.

OBJETIVOS

- **General**

Conocer la forma de operación electrostática interna de los PE's, realizar un estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de Precipitadores Electrostáticos en planta de generación Arizona.

- **Específicos**

1. Fundamentar los razonamientos eléctricos del principio de operación básico en los PE's como complemento de la teoría electromagnética.
2. Determinar la situación ambiental anterior (con orimulsión) y la actual (con bunker) de los gases de escape de los motores de combustión interna en planta Arizona.
3. Elaborar un manual de instrucciones para mejorar el control de la operación y mantenimiento de los precipitadores electrostáticos.
4. Pronosticar posibles anomalías y reparar fallas en los precipitadores electrostáticos.
5. Determinar el aprovechamiento de la utilización de los precipitadores electrostáticos en plantas de generación de energía eléctrica que utilizan combustibles fósiles.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control de emisiones en plantas industriales constan principalmente de precipitadores electrostáticos (ESP's siglas en inglés), empezaron a desarrollarse en el año de 1906 para eliminar impurezas como el polvo, el humo o el vapor que se encuentran suspendidas en el aire o en otros gases. A pesar de ser más caros que otros colectores mecánicos, como los filtros de aire, los precipitadores electrostáticos son más eficientes, sobre todo en la eliminación de partículas muy pequeñas.

En varios países del mundo como sucede en Guatemala, se esta dependiendo de los combustibles fósiles como; el carbón, el bunker y orimulsión, para la generación de electricidad. La combustión de estas sustancias produce además de energía eléctrica, dióxido de carbono y agua, contaminantes en estado sólido, líquido y gaseoso.

Los contaminantes en estado gaseoso son, por mencionar algunos: óxidos de nitrógeno y de azufre (que al combinarse con el agua de la atmósfera producen la lluvia ácida), monóxido de carbono (resultado de una combustión incompleta), oxidantes fotoquímicos y compuestos orgánicos volátiles. También está el material particulado (contaminantes en estado líquido y sólido) como el polvo de cemento, humo, vapores de metales y las cenizas volantes. Estas partículas, nocivas para el aparato respiratorio de los seres vivos, deben ser capturadas para erradicar o disminuir su emisión a la atmósfera.

Planta Arizona, es una planta generadora de energía eléctrica operada con motores de combustión interna, utilizando combustibles fósiles para la producción, anteriormente se importaba combustible llamado orimulsión proveniente de Venezuela, pero por situaciones contractuales ha dejado de importarse, por tal motivo actualmente esta consumiendo HFO (combustible bunker.)

Toda planta generadora que opera con combustible orimulsión debe poseer un sistema de tratamiento para los gases de escape de los motores para reducir la contaminación ambiental; esto conlleva a gastos de equipos, operación y mantenimiento de los mismos. Uno de los componentes de este sistema es un precipitador electrostático (PE siglas en español), el cual se utiliza para atrapar metales especialmente Vanadio que se encuentra en los gases de escape de los motores de combustión interna

Este trabajo busca complementar los conocimientos adquiridos en el área de electrotecnia, especialmente en el curso de teoría electromagnética ya que esta disciplina es una de las bases principales de la operación eléctrica de los precipitadores electrostáticos.

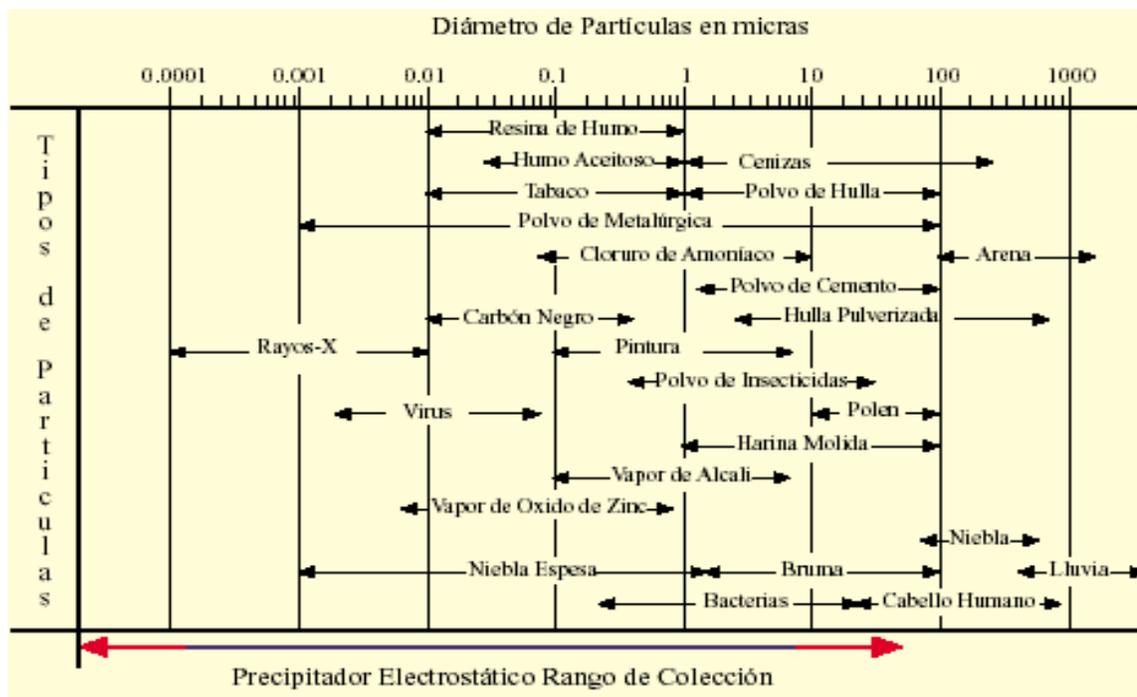
1 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

Un precipitador electrostático (PE) es un dispositivo de control de emisiones, ha sido diseñado para atrapar y remover el material particulado de los gases de salida de las chimeneas utilizando fuerzas eléctricas, para las cuales el tamaño sea menor de $20\mu\text{m}$ en la figura 1, se muestran los diámetros de partículas y el rango de recolección de los PE's

Los precipitadores electrostáticos se usan sobre todo en procesos de alto índice de escape y de emisión, como en generadoras de electricidad y además en industrias tales como: cemento, productos químicos, metales, papel, ingenios azucareros.

La eficiencia de recolección de los PE's varía, dependiendo de su tamaño y calidad, pero en algunos casos se han registrado niveles de reducción superiores a 99%.

Figura 1. Diámetro de partículas y rango de colección de un PE.



1.1 Principios básicos de operación interna del precipitador electrostático

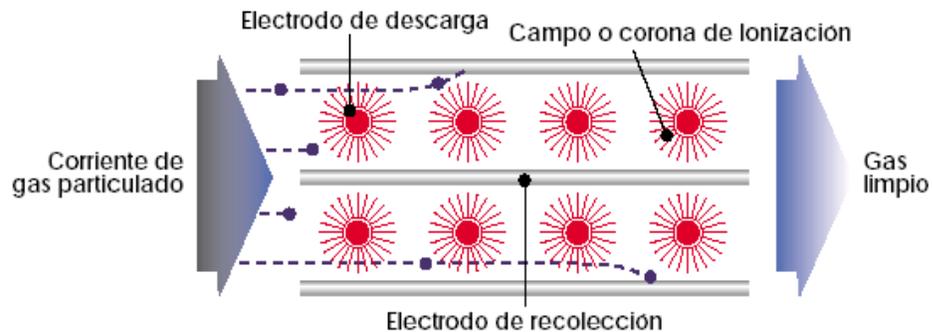
La precipitación electrostática remueve las partículas de los gases de combustión de los procesos, por medio de las siguientes actividades:

- **Ionización:** cargado de partículas.
- **Migración:** transporte de las partículas cargadas a la superficie.
- **Recolección:** precipitación de las partículas cargadas sobre las superficies colectoras.
- **Disipación de la carga:** neutralización de las partículas en las superficies colectoras.
- **Desalojo:** de partículas de las superficies colectoras al recipiente acumulador.
- **Transporte:** de las partículas desde el recipiente acumulador hasta el punto de desecho.

Un alto voltaje (de 45000 a 70000 VDC) se mantiene entre un electrodo que baja por el centro de un ducto y la pared externa de éste es conectada a tierra. El electrodo se mantiene a un potencial negativo respecto de las paredes y así el campo eléctrico está dirigido hacia el electrodo.

El campo eléctrico cerca del electrodo alcanza valores suficientemente altos como para provocar una corona de descarga en torno a él y la formación de iones positivos, electrones e iones negativos como el O_2^- . A medida que los electrones y los iones negativos son acelerados hacia la pared exterior por el campo eléctrico no uniforme, las partículas contaminantes que están en la corriente del gas se cargan por las colisiones y la captura de iones. Ya que la mayoría de las partículas cargadas son negativas, éstas son arrastradas hacia la pared exterior por el campo eléctrico como se muestra en la figura 2. Al sacudir periódicamente el ducto, las partículas caen y se recogen en el fondo, en las tolvas de recolección.

Figura 2. Vista superior del funcionamiento de un precipitador electrostático.



En los PE's de proceso en seco las partículas caen debido a la fuerza de gravedad y generalmente con ayuda de vibradores o golpeteos. Por otra parte en los PE's de proceso en húmedo las partículas son removidas por un chorro de agua hasta su destino final. Cuando el gas de la combustión abandona el precipitador estará libre de cenizas y de material particulado hasta en un 99.9%.

1.2 Tipos de precipitadores electrostáticos

Los PE's están configurados de varias maneras, algunas de estas configuraciones han sido desarrolladas para una acción de control especial y otras han evolucionado por razones económicas, a continuación se describirán los tipos que mas se utilizan.

1.2.1 Precipitadores electrostáticos en húmedo tipo placa-electrodo

Se utilizan en el control de partículas con diámetros aerodinámicos superiores a $2.5\mu\text{m}$ y contaminantes peligrosos del aire en forma particulada, como son la mayoría de los metales a excepción del mercurio. También se emplean frecuentemente para controlar neblinas de ácido y pueden proporcionar un control incidental de compuestos orgánicos volátiles.

1.2.1.1 Funcionamiento básico

Los precipitadores electrostáticos capturan partículas sólidas presentes en el flujo de gas a través de fuerzas electrostáticas. Las partículas se cargan de electricidad y son atraídas hacia placas metálicas con cargas opuestas ubicadas en el precipitador. Estas placas se lavan, ya sea de forma continua o intermitentemente, con un líquido, generalmente agua.

El efluente líquido se retira y puede ser sometido a un tratamiento posterior. En los precipitadores electrostáticos tipo placa, el gas fluye horizontalmente y paralelo a las placas metálicas verticales.

1.2.1.2 Reducciones de emisiones alcanzadas

Las eficacias típicas de control para equipos nuevos varían entre el 99 y el 99.9%, mientras que equipos más antiguos pueden alcanzar valores comprendidos entre el 90 y el 99.9%. El factor que más afecta al grado de eficacia de control alcanzado es el tamaño del precipitador, ya que de este tamaño va a depender el tiempo de duración del proceso.

Cuanto más tiempo permanezca una partícula en el precipitador es más probable que sea atrapada. Por otra parte, el aumento de la fuerza del campo eléctrico, incrementará la eficiencia de recolección del precipitador.

También van a influir en el grado de eficacia de control otros factores, tales como la resistividad del polvo, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas) y la distribución del tamaño de las partículas.

1.2.1.3 Aplicaciones industriales típicas

Los precipitadores electrostáticos en húmedo se utilizan en situaciones en las cuales no son apropiados los precipitadores electrostáticos en seco, como cuando se quiere recolectar material húmedo, pegajoso, inflamable, explosivo o de alta resistividad. Por otra parte, a medida que las eficiencias de recolección requeridas han aumentado, se han incrementado las aplicaciones de los precipitadores electrostáticos en húmedo.

Se utilizan comúnmente en industrias de madera, metalúrgicas y en la producción de ácido sulfúrico, aun cuando también se utilicen en estas industrias otros tipos de precipitadores electrostáticos.

1.2.1.4 Ventajas

Las ventajas de los precipitadores electrostáticos en húmedo son:

1. Las caídas de presión son bajas.
2. Los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos.
3. Son capaces de alcanzar eficacias de control muy altas, incluso con partículas muy pequeñas.
4. Son capaces de operar bajo presiones altas (hasta 1,030 kPa) o en condiciones de vacío.
5. Se pueden manejar razones de flujo relativamente grandes de manera efectiva.
6. Pueden recolectar partículas pegajosas y neblinas, así como polvos explosivos o con alta resistividad.

1.2.1.5 Desventajas

Las desventajas principales son:

1. La inversión inicial es generalmente alta.
2. Los electrodos de descarga fabricados con alambre requieren altos niveles de mantenimiento.
3. Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y condensación ácida.
4. Los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar ocasionando que la parte media del alambre se acerque a las placas, causando chispas y desgaste.
5. En general no son muy apropiados para procesos demasiado variables, debido a su alta sensibilidad a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas, y el cargamento de partículas).
6. Son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas que se necesitan para una recolección eficiente de partículas.
7. Se requiere personal de mantenimiento relativamente sofisticado, así como precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje.
8. El electrodo con carga negativa produce ozono durante la ionización de los gases.

1.2.2 Precipitadores electrostáticos en húmedo tipo tubo-electrodo

Se utilizan en el control de partículas con diámetros aerodinámicos superiores a $2.5\mu\text{m}$, y contaminantes peligrosos del aire en forma particulada, como son la mayoría de los metales a excepción del mercurio. También se emplean frecuentemente para controlar neblinas de ácido y pueden proporcionar un control incidental de compuestos orgánicos volátiles.

1.2.2.1 Funcionamiento básico

Los precipitadores electrostáticos capturan partículas sólidas presentes en el flujo de gas a través de fuerzas electrostáticas. Las partículas se cargan de electricidad y son atraídas hacia placas metálicas con cargas opuestas ubicadas en el precipitador. Estas placas se lavan, ya sea de forma continua o intermitentemente, con un líquido, generalmente agua.

El efluente líquido se retira y puede ser sometido a un tratamiento posterior. En los precipitadores electrostáticos tipo tubo-alambre el gas emitido fluye verticalmente a través de tubos conductivos.

1.2.2.2 Reducciones de emisiones alcanzadas

Las eficacias típicas de control para equipos nuevos varían entre el 99 y el 99.9%, mientras que equipos más antiguos pueden alcanzar valores comprendidos entre el 90 y el 99.9%. El factor que más afecta al grado de eficacia de control alcanzado es el tamaño del precipitador, ya que de este tamaño va a depender el tiempo de duración del proceso.

Cuanto más tiempo permanezca una partícula en el precipitador es más probable que sea atrapada. Por otra parte, el aumento de la fuerza del campo eléctrico, incrementará la eficiencia de recolección del precipitador. También van a influir en el grado de eficacia de control otros factores, como la resistividad del polvo, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas) y la distribución del tamaño de las partículas.

1.2.2.3 Aplicaciones industriales típicas

Los precipitadores electrostáticos en húmedo se utilizan en situaciones en las cuales no son apropiados los precipitadores electrostáticos en seco, como cuando se quiere recolectar material húmedo, pegajoso, inflamable, explosivo o de alta resistividad. Por otra parte, a medida que las eficiencias de recolección requeridas han ido aumentando, se han incrementado las aplicaciones de los precipitadores electrostáticos en húmedo. Se utilizan en ocasiones en la industria textil, papelera y procesadora de pulpa de madera, metalúrgica (incluyendo los hornos de coque), en los incineradores de residuos peligrosos, y en la producción de ácido sulfúrico, entre otros, aunque también son empleados otros tipos de precipitadores electrostáticos.

1.2.2.4 Ventajas

Las ventajas de los precipitadores electrostáticos en húmedo son:

1. Las caídas de presión son bajas.
2. Los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos.
3. Son capaces de alcanzar eficacias de control muy altas, incluso con partículas muy pequeñas.
4. Son capaces de operar bajo presiones altas (hasta 1,030 kPa) o en condiciones de vacío
5. Se pueden manejar razones de flujo relativamente grandes de manera efectiva.
6. Pueden recolectar partículas pegajosas y neblinas, así como polvos explosivos o con alta resistividad.
7. El lavado continuo o intermitente impide la acumulación grande de partículas
8. La atmósfera húmeda que resulta de la limpieza con agua permite recolectar partículas de alta resistividad, absorber gases o producir la condensación de contaminantes.

1.2.2.5 Desventajas

Las desventajas principales son:

1. La inversión inicial es generalmente alta.
2. Los electrodos de descarga fabricados con alambre requieren altos niveles de mantenimiento.
3. Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación ácida.
4. Los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar ocasionando que la parte media del alambre se acerque al tubo, causando chispas y desgaste
5. En general no son muy apropiados para procesos demasiado variables, debido a su alta sensibilidad a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas, y el cargamento de partículas). Son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas que se necesitan para una recolección eficiente de partículas
6. Se requiere personal de mantenimiento relativamente sofisticado, así como precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje.
7. El electrodo con carga negativa produce ozono durante la ionización de los gases
8. Los precipitadores en húmedo se limitan a operaciones con temperaturas por debajo de 80 o 90 °C
9. Generalmente deben ser construidos estos equipos con materiales no corrosivos.

1.2.3 Precipitadores electrostáticos en seco tipo placa-electrodo

Se utilizan en el control de partículas con diámetros aerodinámicos superiores a $2.5\mu\text{m}$ y contaminantes peligrosos del aire en forma particulada, como son la mayoría de los metales a excepción del mercurio.

1.2.3.1 Funcionamiento básico

Los precipitadores electrostáticos capturan partículas sólidas presentes en el flujo de gas a través de fuerzas electrostáticas. Las partículas se cargan de electricidad, siendo atraídas hacia placas metálicas con cargas opuestas ubicadas en el precipitador.

Las partículas se retiran posteriormente de las placas mediante "golpes secos" y se depositan en una tolva situada en la parte inferior de la unidad. En los precipitadores electrostáticos tipo placa, el gas fluye horizontalmente y paralelo a las placas metálicas verticales.

1.2.3.2 Reducciones de emisiones alcanzadas

Las eficacias típicas de control para equipos nuevos varían entre el 99 y el 99.9%, mientras que equipos más antiguos pueden alcanzar valores comprendidos entre el 90 y el 99.9%. El factor que mas afecta al grado de eficacia de control alcanzado es el tamaño del precipitador, ya que de este tamaño va a depender el tiempo de duración del proceso. Cuanto más tiempo permanezca una partícula en el precipitador es más probable que sea atrapada.

Por otra parte, el aumento de la fuerza del campo eléctrico, incrementará la eficiencia de recolección del precipitador. También van a influir en el grado de eficacia de control otros factores, como la resistividad del polvo, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas) y la distribución del tamaño de las partículas.

1.2.3.4 Aplicaciones industriales típicas

Aproximadamente el 80% de todos los precipitadores de este tipo se utilizan en la industria de servicios eléctricos públicos. También se emplean en industrias papeleras y de pulpa de madera (7%), cementera y de otros minerales (3%) y de metales no ferrosos (1%).

1.2.3.4 Ventajas

Las ventajas de los precipitadores electrostáticos en seco son:

1. Los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos.
2. Son capaces de alcanzar eficacias de control muy altas, incluso con partículas muy pequeñas.
3. Son capaces de operar bajo presiones altas (hasta 1,030 kPa) o en condiciones de vacío.
4. Se pueden manejar razones de flujo relativamente grandes de manera efectiva.
5. Pueden operar para un rango amplio de temperaturas de gases, pudiendo alcanzar temperaturas de hasta 700°C.
6. La recolección y eliminación del residuo en seco permite una manipulación fácil. Los costos de operación son relativamente bajos.

1.2.3.5 Desventajas

Las desventajas principales son:

1. La inversión inicial es generalmente alta.
2. Los electrodos de descarga fabricados con alambre requieren altos niveles de mantenimiento.
3. Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación ácida.
4. Los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar ocasionando que la parte media del alambre se acerque a las placas, causando chispas y desgaste.
5. En general no son muy apropiados para procesos demasiado variables, debido a su alta sensibilidad a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas, y el cargamento de partículas).
6. Son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas que se necesitan para una recolección eficiente de partículas.
7. Se requiere personal de mantenimiento relativamente sofisticado, así como precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje.
8. El electrodo con carga negativa produce ozono durante la ionización de los gases.
9. Los precipitadores secos no son aconsejables para recolectar elementos pegajosos o neblinas.

1.2.4 Precipitadores electrostáticos en seco tipo tubo-electrodo

Se utilizan en el control de partículas con diámetros aerodinámicos superiores a $2.5\mu\text{m}$ y contaminantes peligrosos del aire en forma particulada, como son la mayoría de los metales a excepción del mercurio.

1.2.4.1 Funcionamiento básico

Los precipitadores electrostáticos capturan partículas sólidas presentes en el flujo de gas a través de fuerzas electrostáticas. Las partículas se cargan de electricidad, son atraídas hacia placas metálicas con cargas opuestas ubicadas en el precipitador. Las partículas se retiran posteriormente de las placas mediante "golpes secos" y se depositan en una tolva situada en la parte inferior de la unidad. En los precipitadores electrostáticos tipo tubo-electrodo el gas emitido fluye verticalmente a través de tubos conductivos.

1.2.4.2 Reducciones de emisiones alcanzadas

Las eficacias típicas de control para equipos nuevos varían entre el 99 y el 99.9%, mientras que equipos más antiguos pueden alcanzar valores comprendidos entre el 90 y el 99.9%. El factor que más afecta al grado de eficacia de control alcanzado es el tamaño del precipitador, ya que de este tamaño va a depender el tiempo de duración del proceso. Cuanto más tiempo permanezca una partícula en el precipitador es más probable que sea atrapada. Por otra parte, el aumento de la fuerza del campo eléctrico, incrementará la eficiencia de recolección del precipitador.

También van a influir en el grado de eficacia de control otros factores, como la resistividad del polvo, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas) y la distribución del tamaño de las partículas.

1.2.4.3 Aplicaciones industriales típicas

Muchos de los precipitadores electrostáticos antiguos son de diseño tubo-alambre, que consiste en un solo tubo colocado encima de una chimenea.

Los precipitadores electrostáticos en seco de tipo tubo se utilizan en ocasiones en la industria textil, papelera y procesadora de pulpa de madera, metalúrgica (incluyendo los hornos de coque), en los incineradores de residuos peligrosos, y en la producción de ácido sulfúrico, entre otros, aunque también son empleados otros tipos de precipitadores electrostáticos.

1.2.4.4 Ventajas

Las ventajas de los precipitadores electrostáticos en seco son:

1. Los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos.
2. Son capaces de alcanzar eficacias de control muy altas, incluso con partículas muy pequeñas.
3. Son capaces de operar bajo presiones altas (hasta 1,030 kPa) o en condiciones de vacío.
4. Tienen bajas caídas de presión.
5. Pueden operar para un rango amplio de temperaturas de gases, pueden alcanzar temperaturas de hasta 700°C.
6. La recolección y eliminación del residuo en seco permite una manipulación fácil.

1.2.4.5 Desventajas

Las desventajas principales son:

1. La inversión inicial es generalmente alta.
2. Los electrodos de descarga fabricados con alambre requieren altos niveles de mantenimiento.
3. Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación acida.
4. Los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar ocasionando que la parte media del alambre se acerque al tubo, causando chispas y desgaste
5. En general no son muy apropiados para procesos demasiado variables, debido a su alta sensibilidad a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas, y el cargamento de partículas.)
6. Son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas que se necesitan para una recolección eficiente de partículas
7. Se requiere personal de mantenimiento relativamente sofisticado, así como precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje.
8. Los precipitadores secos no son aconsejables para recolectar elementos pegajosos o neblinas.
9. El electrodo con carga negativa produce ozono durante la ionización de los gases.

1.2.5 Precipitadores electrostáticos de placa plana

Un número importante de precipitadores más pequeños (de unos 100,000 a 200,000 acfm de flujo de recolección), utilizan placas planas en lugar de electrodos para alto voltaje. Estas placas planas, incrementan el campo eléctrico promedio que puede ser usado para recolectar las partículas y proporcionan un área superficial aumentada para la recolección de las partículas. Las coronas no pueden generarse sobre las placas planas por si mismas, por lo que se colocan electrodos generadores de coronas por delante y a veces por detrás de las zonas de recolección de las placas planas.

Estos electrodos pueden ser agujas puntiagudas adheridas a los bordes de las placas o electrodos de corona independientes. A diferencia de los PE's de placa-electrodo o de los tubulares, este diseño opera igualmente bien con polaridad ya sea negativa o positiva. Los fabricantes han escogido utilizar polaridad positiva para reducir la generación de ozono.

Un precipitador de placa plana opera con poca o ninguna corriente de corona fluyendo a través del polvo recolectado, excepto directamente bajo las agujas o electrodos de la corona. Esto tiene dos consecuencias; La primera es que la unidad es menos susceptible a la corona invertida a lo que son las unidades convencionales, porque no se genera corona invertida en el polvo recolectado y las partículas cargadas con ambas polaridades de iones tienen gran superficie de recolección disponible. La segunda consecuencia es que la falta de corriente en la capa recolectada causa una fuerza eléctrica que tiende a remover la capa de la superficie de recolección; esto puede conducir a grandes pérdidas por golpeteo.

Los precipitadores de placa plana parecen tener amplia aplicación para partículas de alta resistividad con diámetros másicos medios (DMM's) pequeños (de 1 a 2 μm).

Estas aplicaciones enfatizan especialmente las fortalezas del diseño porque las fuerzas eléctricas desprendedoras son más débiles para las partículas pequeñas que para las grandes. Las cenizas de carbón han sido recolectadas satisfactoriamente con este tipo de precipitadores, pero una baja velocidad de flujo parece ser crítica para evitar pérdidas altas por golpeteo.

1.2.6 Precipitadores electrostáticos tubulares

Los precipitadores originales eran tubulares, como las chimeneas donde eran colocados, con los electrodos a alto voltaje orientados a lo largo del eje del tubo. Los precipitadores tubulares tienen aplicaciones típicas en plantas de adición de ácido sulfúrico, limpieza del gas subproducto de los hornos de coque (remoción de alquitrán), recientemente en plantas de sinterización de hierro y acero.

Tales unidades tubulares aún son utilizadas para algunas aplicaciones, con muchos tubos operando en paralelo para manejar mayores flujos de gas. Los tubos pueden tener forma como un panal circular, cuadrado o hexagonal con el gas fluyendo hacia arriba o hacia abajo. La longitud de los tubos puede seleccionarse según las condiciones. Un PE tubular puede sellarse herméticamente para prevenir fugas de material, especialmente material valioso o peligroso.

Un PE's tubular es esencialmente una unidad de una etapa y es única, en que tiene a todo el gas pasando a través de la región del electrodo. El electrodo a alto voltaje opera a un voltaje en toda la longitud del tubo y la corriente varía a lo largo de su longitud a medida que las partículas son removidas del sistema.

No hay rutas de escabullimiento alrededor de la región de recolección, pero las deformidades de la corona pueden permitir que algunas partículas eviten cargarse en una fracción considerable de la longitud del tubo.

Los PE's tubulares son una porción pequeña de la población de PE's y se aplican más comúnmente donde el particulado es húmedo o pegajoso. Estos PE's, usualmente son limpiados con agua, tienen pérdidas por re-encauzamiento de una magnitud menor que la de los precipitadores de particulado seco.

1.2.7 Precipitadores electrostáticos de dos etapas

Los precipitadores descritos previamente son todos paralelos en naturaleza, los electrodos de descarga y de recolección están lado a lado. El precipitador de dos etapas, es un dispositivo en serie con el electrodo de descarga o ionizador, precediendo a los electrodos de recolección. Para aplicaciones en interiores, la unidad es operada con una polaridad positiva para limitar la generación de ozono.

Las ventajas de esta configuración incluyen más tiempo para cargar las partículas, menos propensión a corona invertida y construcción económica para tamaños pequeños. Este tipo de precipitador es generalmente utilizado para volúmenes de flujo de gas de 50,000 acfm y menos y se aplica a fuentes sub-micrométricas emitiendo rocíos de aceite, humos, gases de combustión u otros particulados pegajosos, porque hay poca fuerza eléctrica para retener a los particulados recolectados sobre las placas.

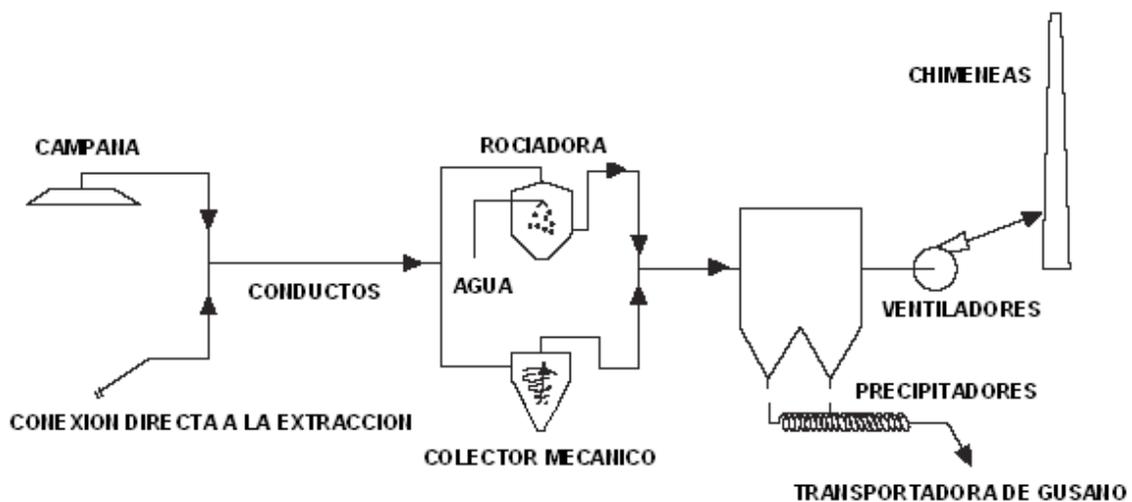
Pueden colocarse módulos en paralelo o en arreglos serie-paralelo, consistentes de un pre-filtro mecánico, ionizador, celda de la placa recolectora, post-filtro y caja de poder.

El pre-acondicionamiento de los gases es normalmente parte del sistema. La limpieza puede ser por lavado con agua de los módulos removidos del sistema, hasta automático *in-situ*, por aspersión del colector con detergente, seguido de secado por sopleteo con aire.

Se considera que los precipitadores de dos etapas son tipos de dispositivos separados y distintos comparados con los PE's grandes de una etapa, de alto volumen de gas. Los dispositivos más pequeños son vendidos usualmente como sistemas en paquete pre-diseñados.

1.3 Equipo auxiliar

Figura 3. Dispositivo de control y equipo auxiliar típico



En la Figura 3 se muestra esquemáticamente el equipo auxiliar típicamente asociado con un sistema de PE's. Junto con el propio precipitador, un sistema de control usualmente incluye el siguiente equipo auxiliar: un dispositivo de captura (campana o conexión directa a la extracción); conductos, equipo de remoción de polvo (transportadores de gusano), ventiladores, motores, arrancadores y chimenea.

Adicionalmente, pueden necesitarse enfriadores por aspersión y colectores mecánicos para pre-acondicionar al gas antes de que llegue al PE's. Usualmente, los dispositivos de captura son campanas que extraen a los contaminantes hacia los conductos o son extracciones directas acopladas a un equipo de combustión o de proceso.

Estos dispositivos usualmente están recubiertos de refractario, enfriados por agua o simplemente fabricados de acero al carbón, dependiendo de las temperaturas de la corriente de gas. Los dispositivos de captura refractarios o enfriados por agua son utilizados donde las temperaturas de pared exceden los 800°F; el acero al carbón es utilizado para temperaturas menores. Los conductos, al igual que el dispositivo de control, deben ser enfriados por agua, refractarios o de acero inoxidable para procesos calientes o de acero al carbón para temperaturas del gas por debajo de 1,150°F (temperaturas de la pared del conducto <800°F).

Los conductos deben dimensionarse para velocidades del gas de aproximadamente 4,000 pies/min. Para el caso promedio, para prevenir la deposición de las partículas en los conductos. Las partículas grandes o densas pueden requerir velocidades mayores, pero raramente se usarán velocidades más bajas.

Las cámaras de aspersión pueden requerirse para procesos en los que la adición de humedad o la disminución de la temperatura o del volumen de gas, pueden mejorar la precipitación o proteger al PE's contra torceduras.

Para procesos de combustión con temperaturas de los gases debajo de aproximadamente 700°F, no se requerirá de enfriamiento y los gases de extracción pueden entregarse directamente al precipitador.

Cuando la mayor parte de la carga de contaminantes consiste de partículas relativamente grandes, pueden utilizarse colectores mecánicos, tales como los ciclones, para reducir la carga al PE's, especialmente con concentraciones altas de entrada. Los ventiladores proporcionan la potencia impulsora para el movimiento del aire y pueden montarse antes o después del PE's.

Una chimenea, normalmente usada, ventea la corriente limpia a la atmósfera. En ocasiones se utilizan transportadores de gusano o neumáticos para retirar el polvo capturado del fondo de las tolvas. Los PE's húmedos requieren que se inyecte o rocíe una fuente de agua para lavado, cerca de la tapa de las placas colectoras, ya sea continuamente o a intervalos de tiempo. El agua fluye con las partículas recolectadas hacia un cárcamo desde el cual el fluido es bombeado. Una porción del fluido puede ser reciclado para reducir la cantidad total de agua requerida. El resto es bombeado directamente a una fosa de asentamiento o pasado a través de un proceso de remoción de agua y la subsiguiente disposición del lodo.

Ocasionalmente se utiliza equipo de acondicionamiento de gas para mejorar el funcionamiento del PE's al cambiar la resistividad, como parte del diseño original, pero es utilizado más frecuentemente para mejorar PE's existentes. El equipo inyecta un agente en la corriente del gas antes del PE. Usualmente, el agente se mezcla con las partículas y altera su resistividad para promover una velocidad de migración mayor y por consiguiente, una eficiencia de recolección mayor.

Sin embargo, las propiedades eléctricas del gas pueden cambiar, en vez de la resistividad del polvo.

1.4 Teoría de la precipitación electrostática

La teoría de la operación del PE requiere de muchas disciplinas científicas para describirla completamente. El PE es básicamente una máquina eléctrica, para la cual sus principales acciones son cargar eléctricamente las partículas y forzarlas hacia las placas recolectoras. La cantidad de materia particulada cargada afecta al punto de operación eléctrico del PE.

El transporte de las partículas se afecta por el nivel de turbulencia en el gas. Las pérdidas mencionadas anteriormente, el escabullimiento y el re-encauzamiento por el golpeteo, son las principales influencias en el comportamiento total del sistema. Las propiedades de partícula también causan un efecto importante en la operación de la unidad.

Las siguientes subsecciones explicarán matemáticamente el proceso de precipitación electrostática de la siguiente manera:

1. Punto de operación eléctrico en el PE.
2. Proceso de cargado de partículas.
3. Recolección de partículas.
4. Escabullimiento y re-encauzamiento por golpeteo.

1.4.1 Punto de Operación Eléctrico

El punto de operación eléctrico de una sección de PE es el valor del voltaje y la corriente al cual opera la sección. Tal y como podría ser, la mejor recolección ocurre cuando está presente el mayor campo eléctrico, lo cual corresponde aproximadamente con el voltaje más alto en los electrodos. En este trabajo, el término “sección” representa un conjunto de placas y electrodos en la dirección del flujo.

Esta unidad es comúnmente llamada un “campo” y una “sección” o “sección conductora” y representa una subdivisión de un “campo” perpendicular a la dirección del flujo.

En un PE modelo y en aplicaciones para determinar el tamaño, los dos términos “sección” y “campo” son utilizados equivalentemente porque la subdivisión en secciones conductoras no debe tener efecto en el modelo. Esta terminología probablemente ha surgido debido al uso frecuente de la palabra “campo” para referirse al campo eléctrico.

El voltaje más bajo aceptable es el voltaje requerido para la formación de la corona, la descarga eléctrica que produce iones para cargar las partículas. La corona (negativa) se produce cuando un electrón libre ocasional cerca del electrodo a alto voltaje, producido por un rayo cósmico, gana suficiente energía del campo eléctrico para ionizar al gas y producir más electrones libres.

El campo eléctrico por el cual este proceso se auto-sostiene, ha sido determinado experimentalmente. Para alambres redondos, el campo en la superficie del alambre está dado por:

$$E_c \approx 3.126 \times 10^6 d_r \left[1 + 0.0301 \left(\frac{d_r}{r_w} \right)^{0.5} \right] \quad (1.1)$$

Donde:

E_c = campo de formación de la corona en la superficie del alambre (V/m)

d_r = densidad relativa del gas, referido a 1 atm. de presión y 20°C (adimensional)

r_w = radio del alambre, metros (m)

Este es el campo requerido para producir una corona “resplandeciente”, la forma usualmente vista en el laboratorio sobre electrodos lisos y limpios. El resplandor aparece como una luz difusa, uniforme y moviéndose rápidamente alrededor del electrodo.

Después de un período de operación, el movimiento se concentra en pequeños puntos sobre la superficie del electrodo y la corona adquiere una apariencia como de penacho. El campo para producir la corona en “penacho”, la forma encontrada en PE’s a escala completa es de 0.6 veces el valor de E_c .

El voltaje que debe aplicarse al electrodo para obtener este valor de campo V_c , se encuentra integrando el campo eléctrico desde el electrodo hasta la placa. El campo sigue una dependencia simple de “1/r” en geometría cilíndrica. Esto lleva a una dependencia logarítmica del voltaje en las dimensiones del electrodo.

En la geometría placa-electrodo, la dependencia del campo es algo más compleja, pero el voltaje aún muestra la dependencia logarítmica. V_c que está dado por:

$$V_c = E_c r_w \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \quad (1.2)$$

Donde:

V_c = voltaje de formación de la corona (V)

d = radio del cilindro exterior para PE tubular (m)

$4/B \times$ (separación placa-electrodo) para PE de placa-electrodo (m)

No fluirá corriente hasta que el voltaje alcance este valor, pero la cantidad de corriente se incrementará pronunciadamente para voltajes arriba de este valor.

La densidad máxima de corriente (amperios/metro²) en la placa o cilindro directamente debajo del electrodo, está dada por:

$$J = \frac{\mu \epsilon V^2}{L^3} \quad (1.3)$$

Donde

J = densidad máxima de corriente (A/m²)

μ = movilidad del ión (m²/V*s)

ϵ = permitividad de espacio libre (8.845 x 10⁻¹² F/m)

V = voltaje aplicado (V)

L = distancia más corta del alambre a la superficie de recolección (m)

Para la corona en penacho, la densidad de la corriente es cero hasta que se alcanza el voltaje de formación de la corona, cuando brinca casi hasta este valor de J dentro de unos pocos cientos de voltios, directamente debajo de un penacho.

La región cerca del alambre está fuertemente influida por la presencia de iones ahí y la magnitud del voltaje de formación de la corona muestra variaciones espaciales fuertes. Fuera de la región de la corona, es muy uniforme.

El campo eléctrico es más fuerte a lo largo de la línea de alambre a placa y es aproximado bastante bien, excepto cerca del alambre, por:

$$E_{\max} = \frac{V}{L} \quad (1.4)$$

Donde

E_{max} = fuerza máxima del campo (V/m)

Cuando el campo eléctrico en todo el claro entre el alambre y la placa se vuelve suficientemente fuerte, ocurrirá una chispa, y el voltaje no podrá ser incrementado sin que ocurra centelleo severo. El campo al cual ocurre la chispa no está definido precisamente, pero un valor razonable está dado por:

$$E_s = 6.3 \times 10^5 \left[\frac{273 * P}{T} \right]^{1.65} \quad (1.5)$$

Donde:

E_s = fuerza del campo centelleante (V/m)

T = temperatura absoluta (°K)

P = presión del gas (atm.)

Este campo podría alcanzarse a un voltaje de, por ejemplo, 35,000 V para un espaciado placa-electrodo de 11.4 cm. (4.5 in.) a una temperatura de 149°C (300°F), el PE operaría generalmente cerca de este voltaje en ausencia de corona invertida, E_{max} será igual o menor que E_s .

En lugar del centelleo, puede ocurrir corona invertida si el campo eléctrico en la capa de polvo resultante del flujo de corriente en la capa alcanza un valor crítico de cerca de 1×10^6 V/m. Dependiendo de las condiciones, la corona invertida puede realizar el centelleo o puede generar tanta corriente que el voltaje no pueda aumentarse más. El campo en la capa está dado por:

$$E_i \approx J \times \rho \quad (1.6)$$

Donde:

E_i = campo eléctrico en la capa de polvo (V/m)

ρ = resistividad del material recolectado (ohm·m)

1.4.2 Proceso de cargado de partículas

El cargado de las partículas toma lugar cuando los iones bombardean la superficie de una partícula. Una vez que un ión está cerca de la partícula, es ligado fuertemente debido a la carga imagen en la partícula. La “carga imagen” es una representación de la distorsión de la carga que ocurre cuando una carga real se aproxima a una superficie conductora.

La distorsión es equivalente a una carga de magnitud opuesta a la carga real, localizada tan abajo de la superficie porque la carga real está por encima de ella. La noción de una carga ficticia es similar a la noción de una imagen en el espejo, de ahí el nombre de carga imagen. A medida que más iones se acumulan sobre la partícula, la carga total tiende a prevenir más bombardeo iónico.

Hay dos mecanismos de carga principales: carga por difusión y carga por campo.

La carga por difusión resulta de la energía cinética térmica de los iones venciendo la repulsión de los iones que ya están sobre en la partícula.

La carga por campo ocurre cuando los iones siguen las líneas del campo eléctrico hasta que terminan sobre una partícula. En general, ambos mecanismos operan para todos los tamaños de partículas.

La carga por campo, sin embargo, agrega un porcentaje más grande de carga de partículas mayores de cerca de $2\mu\text{m}$ en diámetro, y la carga por difusión agrega un porcentaje mayor de partículas menores a acerca de $0.5\mu\text{m}$.

La carga por difusión derivada, produce un nivel de carga de partícula que se incrementa logarítmicamente, dado por:

$$q(t) \approx \left[\frac{rkt}{e} \right] \ln(1 + \lambda) \quad (1.7)$$

Donde:

$q(t)$ = carga de la partícula (C) como función del tiempo, t , en segundos

r = radio de la partícula (m)

k = constante de Boltzmann (j/°K)

T = temperatura absoluta (°K)

e = carga del electrón (1.67×10^{-19} C)

λ = tiempo adimensional dado por:

$$\lambda \approx \frac{\pi r v N e^2 \theta}{k T} \quad (1.8)$$

Donde:

v = velocidad térmica media de los iones (m/s)

N = concentración del número de iones cerca de la partícula (No./m³) y θ es el tiempo real de exposición.

e^2 = tiempo real (tiempo de exposición en la zona de carga) en segundos

La carga por difusión nunca alcanza un límite, pero se vuelve muy lenta después de cerca de tres unidades de tiempo adimensional. Para tiempos de exposición fijos, la carga en las partículas es proporcional a su radio.

La carga por campo también exhibe una dependencia del tiempo, dada por:

$$q(t) \approx \frac{q_s \theta}{\theta + \tau} \quad (1.9)$$

Donde:

q_s = carga de saturación, carga a tiempo infinito (C)

θ = tiempo real (s)

τ = otra unidad de tiempo adimensional

La carga de saturación está dada por:

$$q_s \approx 12\pi\epsilon r^2 E \quad (1.10)$$

Donde:

ϵ = permitividad de espacio libre (F/m)

E = campo eléctrico externo aplicado a la partícula (V/m)

La carga de saturación es proporcional al cuadrado del radio, lo cual explica por qué la carga por campo es el mecanismo dominante para partículas grandes. La constante de tiempo de la carga por campo está dada por:

$$r' \approx \frac{4 \epsilon}{N e \mu} \quad (1.11)$$

Donde:

μ = movilidad del ión

Hablando estrictamente, ambos mecanismos de carga, por difusión y por campo, operan al mismo tiempo en todas las partículas y ninguno es suficiente para explicar las cargas medidas en las partículas. Se ha encontrado empíricamente que una muy buena aproximación a la carga medida está dada por la suma de las cargas predichas por las ecuaciones 1.7 y 1.9 independientemente una de otra, de la siguiente manera:

$$q_{\text{tot}} = q_d(t) + q_f(t) \quad (1.12)$$

Donde:

$q_{\text{tot}}(t)$ = carga de la partícula debida a ambos mecanismos

$q_d(t)$ = carga de la partícula debida a carga por difusión

$q_f(t)$ = carga de la partícula debida a carga por campo

1.4.3 Recolección de la partícula

El campo eléctrico en la zona de recolección produce una fuerza sobre una partícula, proporcional a la magnitud de su campo y a la carga:

$$F_e = q \times E \quad (1.13)$$

Donde:

F_e = fuerza debida al campo eléctrico (N)

q = carga en la partícula (C)

E = campo eléctrico (V/m)

Debido a que el mecanismo de carga por campo proporciona una carga última proporcional al campo eléctrico, la fuerza sobre las partículas grandes es proporcional al cuadrado del campo, lo cual muestra la ventaja de mantener un campo tan alto como sea posible.

Al movimiento de las partículas bajo la influencia del campo eléctrico se le opone la tensión viscosa del gas. Al comparar la fuerza eléctrica y el componente de la fuerza de tensión debido al campo eléctrico (de acuerdo con la ley de Stokes), podemos obtener la velocidad de la partícula:

$$v(q, E, r) \approx \frac{q(E, r) E C(r)}{6 \pi \eta r} \quad (1.14)$$

Donde:

$v(q, E, r)$ = velocidad de la partícula (m/s)

$q(E, r)$ = carga de la partícula (C)

$C(r)$ = corrección de Cunningham a la ley de Stokes (adimensional)

η = viscosidad del gas (Kg/m·s)

La velocidad de la partícula es la rapidez, a la cual la partícula se mueve a lo largo de las líneas del campo eléctrico, hacia las paredes.

Para un campo eléctrico dado, esta velocidad está usualmente en un mínimo para partículas de diámetro de cerca de 0.5 μm . Las partículas más pequeñas se mueven más rápido porque la carga no decrece mucho, pero el factor de Cunningham se incrementa rápidamente a medida que el radio decrece. Las partículas más grandes tienen una carga que se incrementa como r^2 y una tensión viscosa incrementándose solo como r ; la velocidad entonces, se incrementa como r .

La ecuación 1.14 da la velocidad de partícula con respecto a aire en reposo. En un PE, el flujo es usualmente turbulento, con velocidades instantáneas del gas de la misma magnitud que las velocidades de las partículas, pero en direcciones aleatorias.

El movimiento de las partículas hacia las placas de recolección es por tanto un proceso estadístico, con un componente promedio impartido por el campo eléctrico y un componente fluctuante por la turbulencia del gas.

Este movimiento estadístico conduce a una ecuación exponencial de recolección, dada por:

$$N(r) \approx N_o(r) \exp \left[\frac{-v(r)}{v_o} \right] \quad (1.15)$$

Donde:

$N(r)$ = concentración de partículas de tamaño r a la salida de la zona de recolección (No/m^3)

$N_o(r)$ = concentración de partículas de tamaño r a la entrada de la zona (No/m^3)

$V(r)$ = velocidad de partícula dependiente del tamaño (m/s)

V_o = velocidad característica del PE (m/s), dada por:

$$v_o \approx \frac{Q}{A} \approx \frac{1}{SCA} \quad (1.16)$$

Donde:

Q = rapidez de flujo volumétrico del gas (m^3/s)

A = área de la placa de la zona de recolección del PE (m^2)

SCA = área específica de recolección (A/Q) (s/m)

Cuando esta ecuación de recolección es promediada para todos los tamaños de partícula y ponderada de acuerdo a la concentración de cada tamaño, la ecuación de Deutsch resulta, con una penetración (fracción de partículas que escapan) dada por:

$$p \approx \exp(-w_e \times SCA) \quad (1.17)$$

Donde:

p = penetración (fracción)

w_e = velocidad efectiva de migración para el conjunto de partículas (m/s)

La eficiencia de recolección está dada por:

$$Eff (\%) \approx 100(1 - p) \quad (1.18)$$

Y este es el número más frecuentemente utilizado para describir el comportamiento de un PE.

1.4.4 Escabullimiento y re-encauzamiento por golpeteo

El escabullimiento y el re-encauzamiento son considerados mejor en las bases de las secciones dentro de un PE. El escabullimiento ocurre cuando una parte del flujo del gas evita la zona de recolección de una sección. Generalmente, la porción del gas que evita la zona, está totalmente mezclado con el gas que pasa a través de la zona antes de que todo el gas entre a la siguiente sección. No puede suponerse siempre este mezclado, y cuando existen rutas de escabullimiento alrededor de varias secciones, el funcionamiento de todo el PE es seriamente afectado.

Para describir matemáticamente los efectos del escabullimiento y del re-encauzamiento por golpeteo, primero consideramos el escabullimiento por si mismo y luego consideramos los efectos del golpeteo como un promedio de muchos ciclos de golpeteo.

Con la suposición de que el gas está bien mezclado entre secciones, la penetración de cada sección puede ser expresada como:

$$p_s \approx S_N + [(1 - S_N) \times p_c(Q')] \quad (1.20)$$

Donde:

p_s = penetración fraccional de la sección

S_N = fracción del gas que evita la sección (escabullimiento)

$p_c(Q')$ = fracción de las partículas penetrando la zona de recolección, la cual es funcionalmente dependiente de Q' , la rapidez de flujo volumétrico del gas en la zona de recolección, reducida por el escabullimiento (m^3/s)

La penetración de todo el PE es el producto de las penetraciones de las secciones.

El escabullimiento establece un límite más bajo en la penetración de partículas a través de la sección.

Para calcular los efectos del golpeteo, primero calculamos la cantidad de material capturado en las placas de la sección. La fracción del material que es atrapado está dada por:

$$\frac{m}{m_o} \approx 1 - p_s \approx 1 - S_N - [(1 - S_N) \times p_c(Q')] \quad (1.21)$$

Donde:

m/mo = fracción masa recolectada de la corriente de gas

Este material se acumula hasta que las placas son golpeadas, después de lo cual la mayor parte del material cae dentro de la tolva para su disposición, pero una fracción es re-encauzado y sale de la sección. Se han conducido mediciones experimentales en PE's para cenizas flotantes para evaluar la fracción re-encauzada, la cual promedia cerca de 12 por ciento.

La penetración promedio para una sección, incluyendo escabullimiento y re-encauzamiento, es:

$$p_s \approx S_N + [(1 - S_N) \times p_c(Q')] + RR(1 - S_N)[1 - p_c(Q')] \quad (1.22)$$

Donde:

RR = fracción reencauzada

Esto puede escribirse en una forma más compacta como:

$$p_s \approx LF + [(1 - LF) \times p_c(Q')] \quad (1.23)$$

Substituyendo LF (factor de pérdida) por $S_N + RR(1 - S_N)$. Estas fórmulas pueden permitir cantidades variables de escabullimiento y re-encauzamiento por golpeteo para cada sección, pero no existe evidencia experimental para sugerir que sea necesario.

Los precipitadores para cenizas flotantes analizados de esta manera tienen un S_N promedio de 0.07 y un RR de 0.12.

Estos valores son los mejores de que se dispone ahora, pero algunos PE's húmedos que presumiblemente no tienen pérdidas por golpeteo, han mostrado valores de S_N de 0.05 o menos.

Estos valores ofrecen un medio para estimar el funcionamiento de PE's cuyas características actuales no son conocidas, pero acerca de los cuales puedan hacerse afirmaciones generales. Por ejemplo, se esperaría que los PE's húmedos tuvieran una $RR = 0$, como lo tendrían los PE's que recolectan partículas húmedas o pegajosas.

Se esperaría que los materiales particulados con un diámetro másico medio (DMM) menor que las cenizas flotantes tuvieran un factor RR menor porque son retenidas fuertemente a las placas y entre ellas. Los factores de escabullimiento son más difíciles de ser calculados, a menos que se hayan hecho esfuerzos especiales en el diseño para controlar el escabullimiento, por tal motivo debe usarse el valor de 0.07.

2 ESTUDIO AMBIENTAL

2.1 Normativa Ambiental utilizada para el control de emisiones en plantas termoeléctricas

La normativa utilizada es la que se encuentra en el manual para la prevención y disminución de la contaminación realizada por el grupo del Banco Mundial y aprobado en julio de 1998, en el cual se cita el manual de prácticas para plantas nuevas de energía termoeléctrica el cual hace referencia en los límites permisibles de emisiones de la siguiente manera:

- **Material particulado:** Para todas las plantas o unidades, las emisiones de PM (material particulado de todos los tamaños) no deben exceder 50 mg/Nm³. El EA debe prestar la atención específica a partículas más pequeñas de 10 µm de diámetro aerodinámico (PM₁₀) en el aire saliente, puesto que son éstos los inhalados en los pulmones y se asocian a los efectos más serios sobre salud humana.

Donde los niveles posibles de ambiente de partículas finas (menores que 2.5 milímetros de diámetro) deben ser medidos. La evidencia epidemiológica reciente sugiere mucho por el daño de salud causado por la exposición a las partículas ya que se asocia a estas partículas finas, las cuáles penetran lo más profundamente posible en los pulmones. En emisiones de PM₁₀ y de partículas finas se debe incluir; la ceniza, hollín y los compuestos del carbón (a menudo los resultados de la combustión incompleta), los condensados ácidos, los sulfatos y nitratos, así como el plomo, cadmio, y otros metales. Partículas finas, incluyendo los sulfatos, los nitratos, y los compuestos del carbón, también son formados por procesos químicos adentro de la atmósfera, pero ellos tienden a dispersarse sobre el conjunto de aire saliente.

- **Dióxido de sulfuro:** Emisiones totales del dióxido de sulfuro de las centrales eléctricas o de las unidades deben ser menores de 0.20 toneladas por día métrico (tpd) por MWe de la capacidad para los primeros 500 MWe, más 0.10 tpd para cada uno de los MWe adicionales de la capacidad sobre los 500 MWe.

Además, la concentración del dióxido de sulfuro en los tubos de los gases no deben exceder 2.000 mg/Nm^3 , las emisiones máximas no deben exceder el límite de 500 tpd. La construcción de dos o más plantas separadas en la misma circunvalación de aire saliente no es aceptable.

- **Óxidos de nitrógeno:** Los límites específicos de las emisiones para los óxidos de nitrógeno son 750 mg/Nm^3 , o 260 nanogramos por Jules (ng/J), o 365 partes por millón (ppm) para una central eléctrica con carbón y hasta 1.500 mg/Nm^3 para las plantas usando el carbón con la materia volátil menor del 10%; 460 mg/Nm^3 (o 130 ng/J, o 225 ppm) para una central eléctrica de combustión; y 320 mg/Nm^3 (o 86 ng/J, o 155 ppm) para una central eléctrica de gas.

Para las unidades de las turbinas de combustión, los niveles máximos de las emisiones de NOx son 125 mg/Nm^3 (de oxígeno seco al 15%) para la de gas; 165 mg/Nm^3 (de oxígeno seco al 15%) para las de diesel (combustible No.2); y 300 mg/Nm^3 (oxígeno seco al 15%) para las de combustible (No. 6 y otros); donde hay dificultades técnicas, tales como escasez del agua disponible para la inyección del agua, una variación de las emisiones son permitidas hasta un nivel máximo hasta 400 mg/Nm^3 (oxígeno seco al 15%) se consideran aceptables, con tal que no haya preocupaciones ambientales significativas asociadas a los niveles ambiente del dióxido del ozono o del nitrógeno.

Las centrales eléctricas donde se manejan motores de combustión, el EA debe prestar atención particular a los niveles de los óxidos del nitrógeno antes y después de la terminación del proyecto.

A condición de que los niveles de ambiente máximos resultantes del dióxido del nitrógeno sean menores de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en 24 hrs. promedio), las guías específicas de las emisiones son:

- a) para los usos de financiamiento recibidos después del 1 de julio de 2000, los niveles de las emisiones de NO_x debe ser menores de $2.000 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (o 13 gramos por kilovatio hora, g/Kwh . en oxígeno seco al 15%)
- b) para usos de financiamiento recibidos antes del 1 de julio de 2000, los niveles de las emisiones de NO_x deben ser menos de $2.300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (o 17 g/Kwh . en oxígeno seco al 15%). En todos otros casos, los niveles máximos de los óxidos de nitrógeno deben ser de $400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (en oxígeno seco al 15%).

Las guías que se presentan en la Tabla I deben ser utilizadas solamente para realizar un dictamen del ambiente en ausencia de estándares de ambiente locales.

Estas guías fueron elaboradas como el consenso que valora el tener en cuenta particular los estándares del WHO, del USEPA, del EU y del manual de prácticas. No son algún sustituto de cualquier manera para propios estándares de calidad ambiente del aire de un país.

Tabla I. Calidad ambiental del aire en centrales termoeléctricas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Contaminante	Promedio de 24 hrs.	Promedio anual
a. PM_{10}	150	50
b. TSP	230	80
c. NO_2	150	100
d. SO_2	150	80

Nota: Para las plantas más pequeñas de 50 MWe, incluyendo esos combustibles ardientes no fósiles, los niveles de las emisiones de PM_{10} pueden estar tanto como $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Si son justificados por el EA, los niveles de las emisiones de PM_{10} hasta $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ pueden ser aceptables en circunstancias especiales. Los niveles máximos de las emisiones para los óxidos del nitrógeno siguen siendo iguales, mientras que para el dióxido de sulfuro, las emisiones máximas alcanzadas son $2.000 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

2.2 Mediciones de emisiones en generadores de motores de combustión interna generando con combustible Bunker y combustible Orimulsión sin utilizar precipitadores electrostáticos.

Las emisiones obtenidas de las mediciones realizadas en los días 18 y 19 de junio del 2003 son la que se muestran en la Tabla II, estas mediciones fueron tomadas cuando unidades 1, 3 y 5 se encontraban generando con combustible bunker (HFO); en la Tabla III se muestran las mediciones obtenidas del día 19 de abril del 2004, en el cual se encontraba la unidad 1 generando con combustible Orimulsión.

Tabla II. Emisiones de las unidades generando con Bunker (HFO) y sin usar PE's

Fuente Muestreada	Contaminantes	Concentración Determinada	Emisión determinada	Norma Banco Mundial (Julio 1998)
Unidad de Generación MD-1 con Caldera de Recuperación de Calor	Material Particulado Total	74.05 (mg/Nm ³)	8.4173 kg/hr	≤ 50 (mg/Nm ³)
	NO _x	1509.44 (mg/ Nm ³)	171.58 kg/hr	< 2000 (mg/Nm ³)
	SO ₂	766.53 (mg/ Nm ³)	87.133 kg/hr	≤ 2000 (mg/Nm ³)
	CO	40.828 (mg/ Nm ³)	4.641 kg/hr	NA
Unidad de Generación MD-3 con Caldera de Recuperación de Calor	Material Particulado Total	77.26 (mg/ Nm ³)	9.146 kg/hr	≤ 50 (mg/Nm ³)
	NO _x	1484.27 (mg/ Nm ³)	175.71 kg/hr	< 2000 (mg/Nm ³)
	SO ₂	796.98 (mg/ Nm ³)	94.35 kg/hr	≤ 2000 (mg/Nm ³)
	CO	37.501 (mg/ Nm ³)	4.439 kg/hr	NA
Unidad de Generación MD-5 sin Caldera de Recuperación de Calor	Material Particulado Total	77.29 (mg/ Nm ³)	8.131 kg/hr	≤ 50 (mg/Nm ³)
	NO _x	1575.63 (mg/ Nm ³)	165.76 kg/hr	< 2000 (mg/Nm ³)
	SO ₂	697.107 (mg/ Nm ³)	73.341 kg/hr	≤ 2000 (mg/Nm ³)
	CO	37.983 (mg/ Nm ³)	3.996 kg/hr	NA

Tabla III. Emisiones de las unidades generando con Orimulsión y sin usar PE's

Fuente muestreada	Contaminantes	Concentración determinada	Emisión Determinada	Norma Banco Mundial (Julio 1998)
Unidad de Generación MD-1 con Caldera de Recuperación de Calor	Material Particulado Total	139.20 (mg/ Nm ³)	11.18 kg/hr	≤ 50 (mg/Nm ³)
	NO _x	1115.39 (mg/ Nm ³)	89.67 kg/hr	< 2000 (mg/Nm ³)
	SO ₂	1778.97 (mg/ Nm ³)	143.02 kg/hr	≤ 2000 (mg/Nm ³)
	CO	92.075 (mg/ Nm ³)	7.402 kg/hr	NA

2.3 Mediciones de emisiones en generadores de motores de combustión interna generando con combustible Bunker y combustible Orimulsión, utilizando precipitadores electrostáticos.

Las emisiones obtenidas de las mediciones realizadas en el día 11 de abril del 2005 son la que se muestran en la Tabla IV, estas mediciones fueron tomadas cuando unidades se encontraban la unidades del 1 al 5 generando con combustible bunker (HFO); en la Tabla V se muestran las mediciones obtenidas del día 18 de marzo del 2006 en el cual se encontraba la unidad 1 generando con combustible Orimulsión.

Tabla IV. Emisiones de las unidades generando, utilizando Bunker (HFO) y PE's

Fuente muestreada	Contaminantes	Concentración Determinada	Emisión Determinada	Norma Banco Mundial (Julio de 1998)
Unidades de Generación MD-01 al MD-05	Material Particulado Total	10.99 (mg/Nm ³)	3.4538 kg/hr	≤ 50 (mg/Nm ³)
	NO _x	1108.42 (mg/Nm ³)	348.388 kg/hr	< 2000 (mg/Nm ³)
	SO ₂	0 (mg/Nm ³)	0 kg/hr	≤ 2000 (mg/Nm ³)
	CO	44.9318 (mg/Nm ³)	14.1225 kg/hr	NA

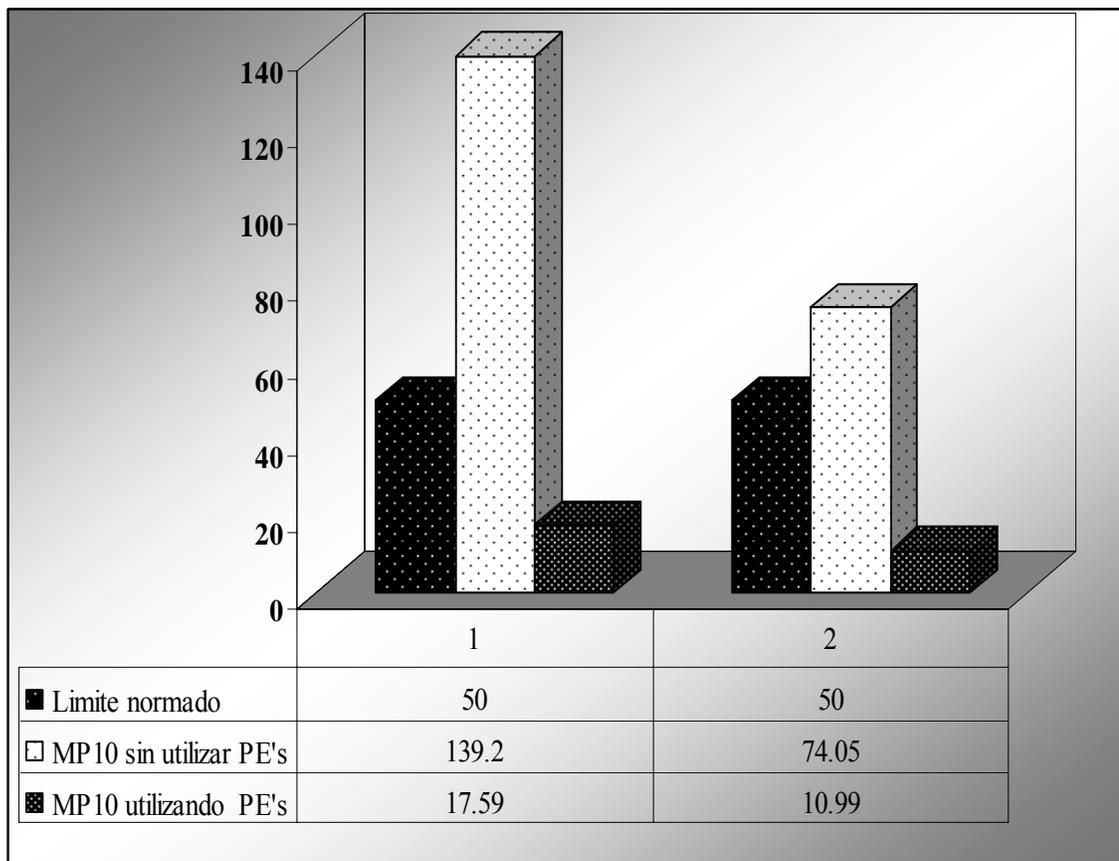
Tabla V. Emisiones de las unidades generando, utilizando Orimulsión y PE's

Fuente muestreada	Contaminantes	Concentración Determinada	Emisión Determinada	Norma Banco Mundial (Julio de 1998)
Unidad de Generación MD-01	Material Particulado Total	17.59 (mg/Nm ³)	6.1153 kg/hr	≤ 50 (mg/Nm ³)
	NO _x	1431.093 (mg/Nm ³)	182.3363 kg/hr	< 2000 (mg/Nm ³)
	SO ₂	886.6785 (mg/Nm ³)	112.9722 kg/hr	≤ 2000 (mg/Nm ³)
	CO	100.4286 (mg/Nm ³)	12.7956 kg/hr	NA

2.4 Comparación de las emisiones de material particulado obtenidas al no utilizar PE's y al haber utilizado PE's

En la figura 4, se muestra la comparación realizada para las emisiones de material particulado de las emisiones con relación al límite establecido por la normativa del Banco Mundial, el cual debe ser $\leq 50 \text{ mg/Nm}^3$, definidas en dos categorías con relación al combustible utilizado para la generación; 1. Para combustible Orimulsión, 2. Para combustible Bunker (HFO).

Figura 4. Comparación de emisiones de material particulado



2.5 Evaluación de impacto ambiental

2.5.1 Calidad del aire ambiental externo a planta Termoeléctrica Arizona

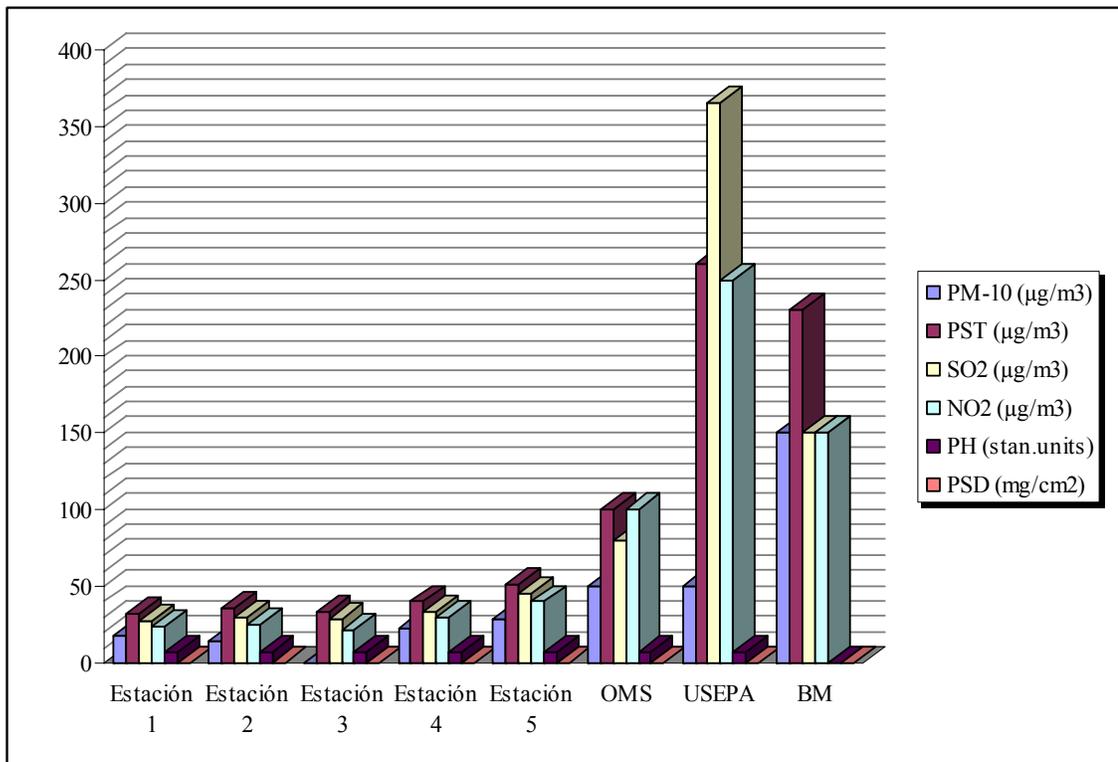
Los datos de línea base que se utilizan para esta evaluación son los mostrados en la Tabla VI, en la cual se recopila las mediciones realizadas del 10 al 14 de septiembre del 2001 en las estaciones siguientes:

- Estación No.1, casa privada del Sr. Orlando Castillo
- Estación No. 2, casa privada Sra. Estela Marina López
- Estación No. 3, casa privada aldea Arizona
- Estación No. 4, casa privada vecindario El Peñate
- Estación No. 5, casa privada vecindario Puerta de Hierro

Tabla VI. Mediciones de estaciones monitoreadas para planta Arizona

	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 5	OMS	USEPA	BM
PM ₁₀ (µg/m ³)	18	14	---	23	29	50	50	150
PST (µg/m ³)	32	36	33	40	51	100	260	230
SO ₂ (µg/m ³)	27	30	29	33	45	80	365	150
NO ₂ (µg/m ³)	24	25	21	30	40	100	250	150
PH (stan.units)	7	7	7	7	7	7	7	---
PSD (mg/cm ²)	0.008	0.0012	0.0011	0.0014	0.0017	0.016 7	---	---

Figura 5. Evaluación comparativa de estaciones monitoreadas y límites establecidos por la OMS, el BM y USEPA



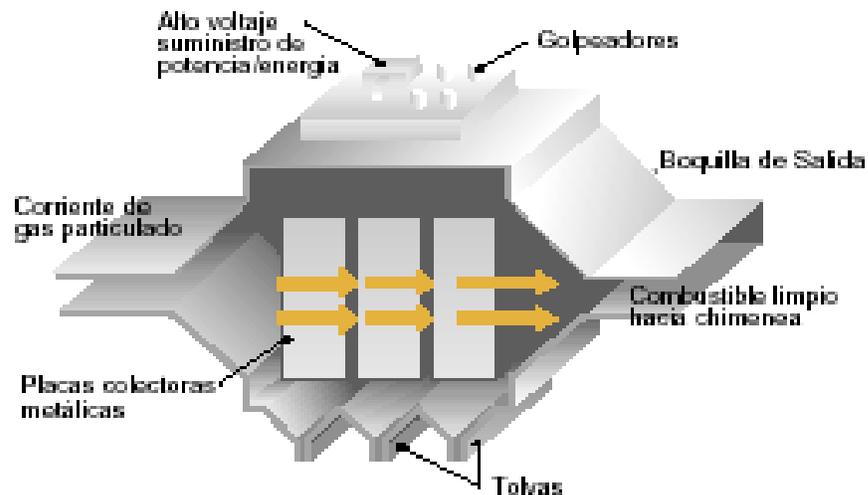
De la figura 5, se puede observar que el control de las emisiones de material particulado utilizando precipitadores electrostáticos, se logran mantener en valores por debajo de los márgenes establecidos por los agentes reguladores de la calidad de aire ambiental.

3 ESTUDIO TÉCNICO

3.1 Descripción general del proceso de control de emisiones

Los gases de escape del motor de combustión ingresan al embudo de entrada del precipitador electrostático y después hacia la carcasa del precipitador donde se realiza la recolección del polvo. El gas purificado es llevado desde la carcasa del precipitador a través del embudo de salida por medio de conductos de gases de combustión hacia la chimenea, tal y como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Descripción general del proceso de control de emisiones



En la entrada del precipitador se ubican dos placas de distribución de gas que constan de placas perforadas e instaladas de manera tal que imprimen a la salida de gas una velocidad constante en toda la superficie transversal del precipitador.

El precipitador electrostático tiene dos sistemas de electrodos: electrodos emisores de chispas y electrodos colectores de polvo.

Los electrodos del sistema emisor están conectados a un rectificador de alta tensión colocado sobre el techo del precipitador.

Cada sistema emisor se sostiene por cuatro aisladores de apoyo. Los aisladores están colocados en compartimientos del aislador que se encuentran aislados y provistos de calefacción eléctrica.

El objetivo de la calefacción de los compartimientos aislantes es evitar la condensación en los aisladores de apoyo, lo que puede causar cortocircuitos con desprendimiento de chispas y agrietamiento.

El polvo contenido en el gas se recoge dentro de la carcasa del precipitador a través de ionización, por medio a un campo eléctrico.

Los electrodos emisores y colectores están preparados para formar varios canales de gas. Los emisores están conectados eléctricamente al polo negativo del rectificador de alta tensión, mientras que los colectores se conectan al terminal de puesta a tierra común (polo positivo.)

Los electrodos emisores emiten iones en sus inmediaciones, cargando negativamente las partículas de polvo. Haciendo uso de mecanismos de sacudida mecánica de control programado, el polvo recogido es extraído de los electrodos y cae al fondo del precipitador.

Desde ahí se conduce por medio de un transportador helicoidal y válvulas rotativas y hacia el transportador de cadena y con el elevador de cangilones hasta el silo de cenizas.

3.2 Construcción del precipitador electrostático

Las piezas estructurales de las que se compone el precipitador electrostático son:

- Carcasa
- Aisladores de apoyo
- Limpieza con aire caliente
- Placas de distribución de gas de entrada y salida
- Sistema emisor
- Golpeteo en el sistema emisor
- Sistema colector
- Golpeteo del sistema colector
- Calefacción de las tolvas inferiores
- Sistemas rociadores
- Sistema de transporte de polvo
- Silo y sistema de descarga de polvo

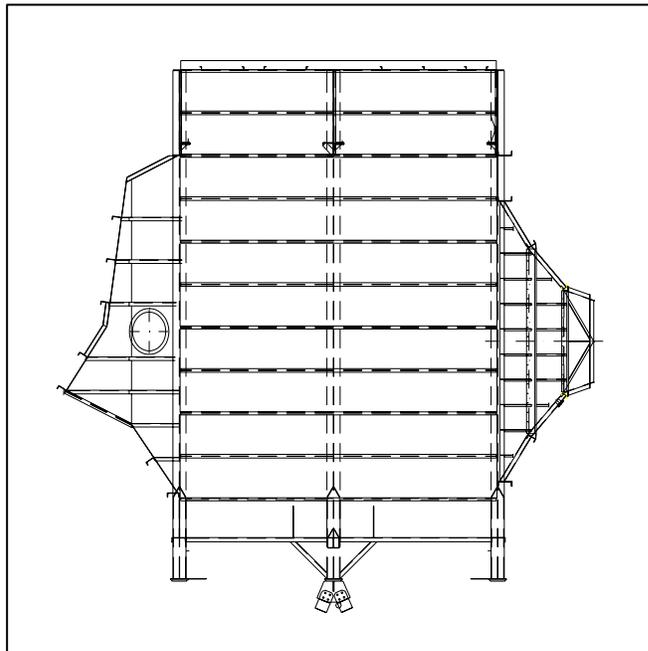
3.2.1 Carcasa

Las columnas de la carcasa compacta se encuentran en el interior de la pared de la carcasa, produciendo una superficie exterior plana lo que simplifica la construcción y aislamiento. Todas las cargas de la carcasa son llevadas por vigas pórtico colocadas en los conductos entre los campos que transfieren las cargas directamente a la estructura de apoyo y cimientos.

En el caso de precipitadores grandes se instalan soportes centrales internos para trasladar las cargas del techo hacia los cimientos. Todas las columnas internas están ubicadas en los conductos de inspección entre los campos. La carcasa del precipitador es de acero al carbono.

La carcasa del precipitador está conectada a los conductos de gas de combustión en los embudos de entrada y salida y está provista de puertas de inspección y compartimentos aislantes colocados en el techo de la carcasa del precipitador.

Figura 7. Carcasa del precipitador electrostático



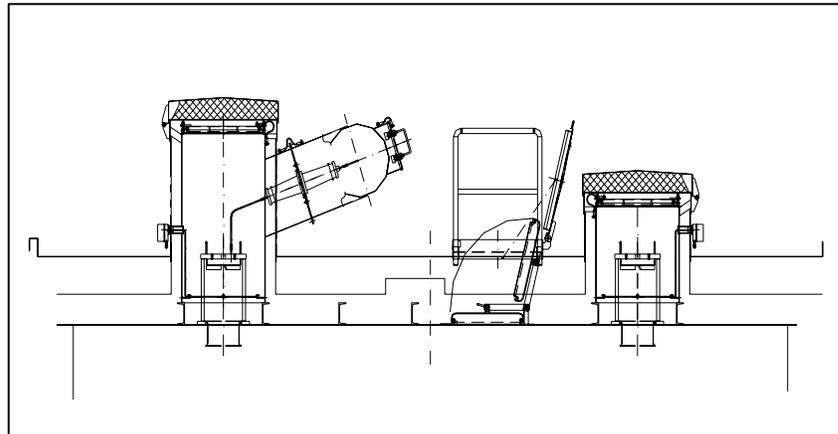
3.2.2 Aisladores de apoyo

Los aisladores de apoyo están ubicados en compartimentos del techo de la carcasa, los compartimentos aislantes, ya sean de diseño de túnel o cajas separadas, dependiendo del ancho de la carcasa, están aislados y calentados (normalmente en forma eléctrica) para mantener los aisladores por encima del punto de condensación del gas de combustión.

El sistema básico de calentamiento tiene un elemento calentador para cada aislador.

Los compartimentos cuentan con aperturas superiores para facilitar el acceso para inspección y servicio.

Figura 8. Aisladores de apoyo



3.2.3 Limpieza con aire caliente

El sistema de limpieza con aire caliente consiste de un ventilador, un dispositivo de calentamiento de espiral y tuberías de aire. El sistema de calentamiento es un sistema separado para cada precipitador.

El objetivo del sistema es mantener los aisladores de apoyos limpios y secos y evitar así la condensación en las superficies internas de los aisladores y limpiar las superficies de los ejes de aislamiento.

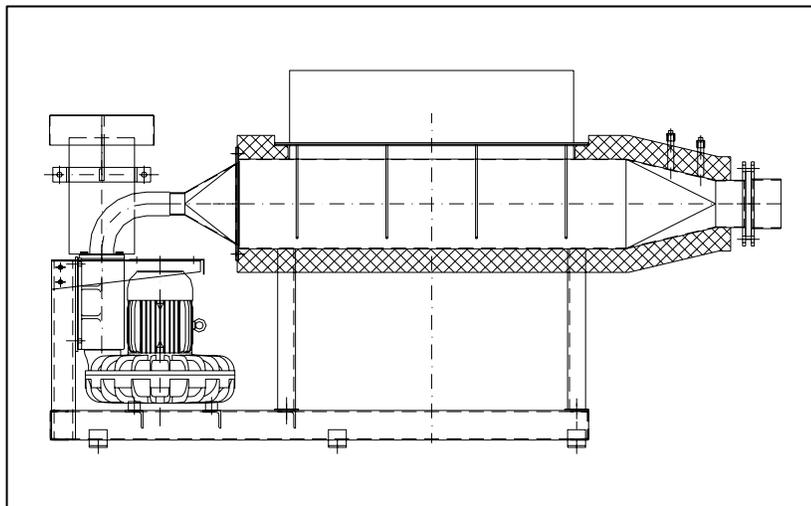
La limpieza con aire caliente comienza automáticamente cuando se encienden las unidades de transformadores rectificadores.

El aire se lleva por medio del ventilador, a través de las tuberías y por las resistencias de calentamiento hacia los compartimentos de los aisladores.

El aire caliente se conduce desde los compartimentos del aislador a través de agujeros perforados en las bridas de los apoyos del aislador para limpiar las superficies internas de los aisladores.

Cuando las resistencias están activas, el ventilador debe estar en funcionamiento para impedir que las resistencias se recalienten. El serpentín calentador está provisto de un termostato y un disyuntor y está conectado de manera que el ventilador deba estar en marcha antes de encender el dispositivo calentador.

Figura 9. Limpieza con aire caliente



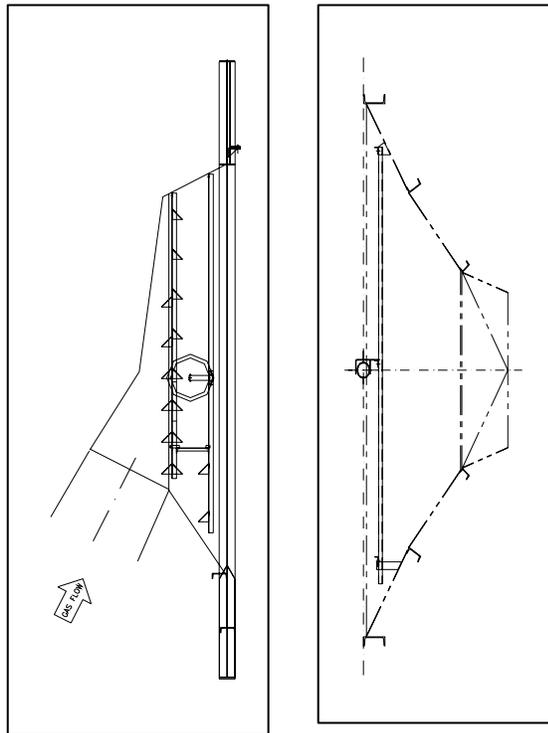
3.2.4 Placas de distribución de gas de entrada y salida

El sistema de distribución de gas consiste de dos placas perforadas suspendidas del embudo de entrada del precipitador y guiadas por una escalera que impide que las placas se muevan en la dirección de la circulación de gas. Las placas tienen aspas de guía y, en ciertos casos, placas estranguladoras para dar al gas una velocidad constante por encima de toda la superficie transversal del precipitador.

Placas dobladas en forma de U en el embudo de salida del precipitador facilitan la distribución del gas. Las placas de distribución de gas de salida no llevan aparatos de golpeteo.

Entre el fondo llano de la carcasa del precipitador y los sistemas de electrodos y entre los electrodos colectores y las paredes laterales de la carcasa del precipitador se encuentran varias placas deflectoras que impiden que el gas emane al exterior del sistema de electrodos.

Figura 10. Placas de distribución de entrada y salida



3.2.5 Sistema emisor de chispas

Los electrodos emisores son electrodos Multipeak (electrodos de descarga rígida) centrados con relación a los electrodos colectores de polvo. Los electrodos emisores conforman el armazón del sistema emisor.

Esta estructura está unida a dos vigas de apoyo superior y se sostiene por cuatro aisladores de apoyo en el techo del precipitador.

Durante la construcción los marcos Multipeak se cuelgan y sueldan firmemente a un marco superior que a su vez se encuentra suspendido de cuatro aisladores colocados en el techo de la cubierta, fuera de la corriente de gas.

En el fondo, los marcos están conectados a grilletes de guía y tras completar la construcción el sistema emisor de electrodos forma una estructura de caja rígida. No son necesarios estabilizadores ya que no hay posibilidad de balanceo del marco y la estructura está libre para expandirse en cualquier dirección.

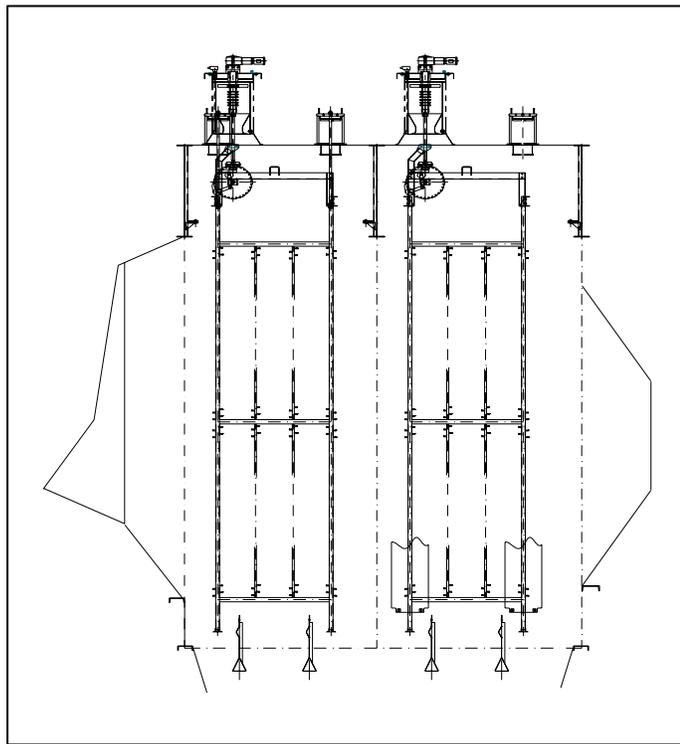
El motor de engranajes de control programado está eléctricamente aislado de la alta tensión y acciona el mecanismo de golpeteo de manera que el movimiento rotativo del motor se transmita a través del eje del aislador al eje del mecanismo de golpeteo.

El eje del aislador se calienta por medio de una resistencia eléctrica para evitar la condensación y sus consecuentes cortocircuitos con desprendimiento de chispas.

Los dispositivos de accionamiento de los mecanismos de golpeteo del sistema emisor están colocados en el techo del precipitador.

Sobre los ejes del mecanismo de golpeteo se encuentran martillos de sacudida mecánica colocados en diversos ángulos. Los martillos golpean yunques de choque separados a intervalos regulares.

Figura 11. Sistema emisor de chispas

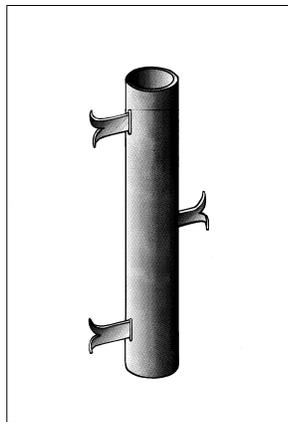


3.2.6 Electrodo emisor

El electrodo rígido de descarga Multippeak ha sido desarrollado y optimizado para satisfacer los criterios fundamentales de un electrodo emisor confiable y eficaz, es decir, distribución de corriente, resistencia aerodinámica a la erosión, fatiga mecánica causada por el golpeteo y efectividad en términos de limpieza.

El electrodo tiene un cuerpo tubular al que están soldadas varias púas. Cada púa tiene dos puntas en dirección a la superficie colectora. Estas puntas tienen una forma especial para generar las características de corriente/voltaje deseadas sin que sean sensibles a la erosión eléctrica.

Figura 12. Electrodo emisor



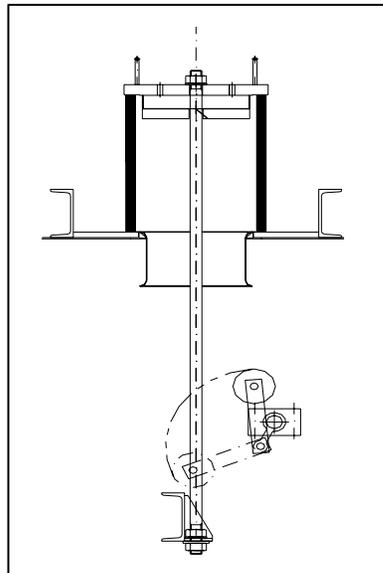
3.2.7 Golpeteo del sistema de descarga

Durante la precipitación electrostática una fracción de polvo se recogerá en los electrodos emisores y en la estructura. Si se permite que la capa de polvo crezca la corona se suprimirá gradualmente. En consecuencia, es fundamental sacudir los electrodos y la estructura para impedir la acumulación del polvo. Martillos caedizos montados sobre ejes horizontales son los que realizan esa labor. Los martillos golpean yunques especiales adosados a la parte superior de la estructura y colocados entre los marcos emisores que transfieren con efectividad la energía de golpeteo al sistema de electrodos emisores. Los martillos caedizos son mecánicamente reforzados de manera que puedan operar en cualquier salida de gas cargado de polvo.

Existe un sistema de golpeteo instalado por cada sección eléctrica de bus. La operación de cada sistema de golpeteo está controlada en forma independiente por un microprocesador y programada para una frecuencia óptima de golpeteo respecto de la recolección y el re-arrastre del polvo. La unidad de accionamiento para el golpeteo de los electrodos emisores está colocada sobre el techo del PE. El eje aislador se encuentra en una caja aislada y calentada en forma eléctrica.

El aislador está protegido por limpieza de aire caliente.

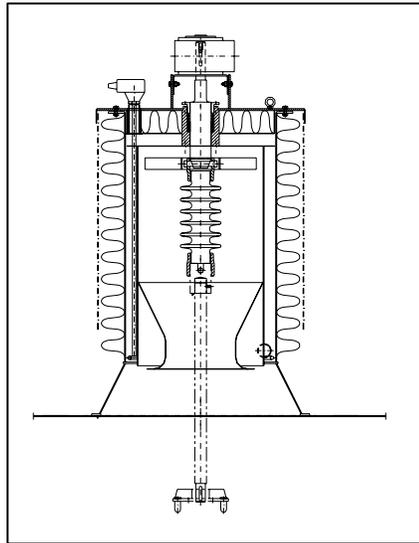
Figura 13. Golpeteo del sistema de descarga



3.2.8 Accionamiento del aparato de golpeteo del sistema emisor

La unidad de accionamiento para el golpeteo de los electrodos emisores está colocada sobre el techo del precipitador electrostático. El eje aislador se encuentra en una caja aislada y calentada en forma eléctrica.

Figura 14. Accionamiento del aparato de golpeteo del sistema emisor



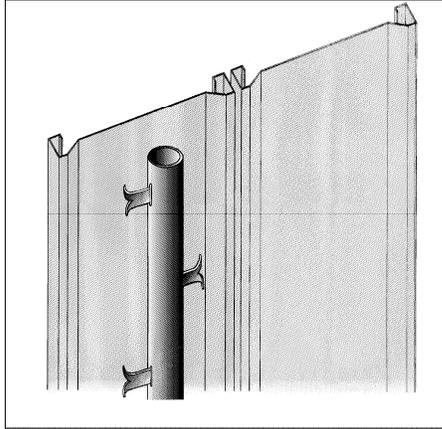
3.2.9 Sistema colector

Las placas colectoras están colgadas de una estructura de techo separada y ajustable y firmemente conectadas a esta estructura garantizando la máxima transferencia de la energía de golpeteo esto se puede apreciar en la figura 13. Si fuera necesario, el conjunto de suspensión y barra de choque puede ser ajustado verticalmente, para facilitar la alineación de todo el sistema.

Para cada placa colectoras hay un electrodo Multipeak tal y como se muestra en la figura 15. Estas placas están en el fondo, conectadas a grilletes de guía especiales y a laterales bien guiados para eliminar vibraciones y alineaciones defectuosas.

Las placas colectoras crean una cortina estable, ya que están fuertemente unidas en la parte superior e inferior.

Figura 15. Placa colectora con electrodo Multipeak



3.2.10 Mecanismo de golpeteo del colector de polvo

Mecanismos de sacudida con martillos caedizos eliminan por golpeteo el polvo recogido de los electrodos colectores. El golpe se transfiere por medio de las barras de choque de los martillos a los electrodos colectores. Motores de engranajes de control programado accionan los mecanismos de golpeteo.

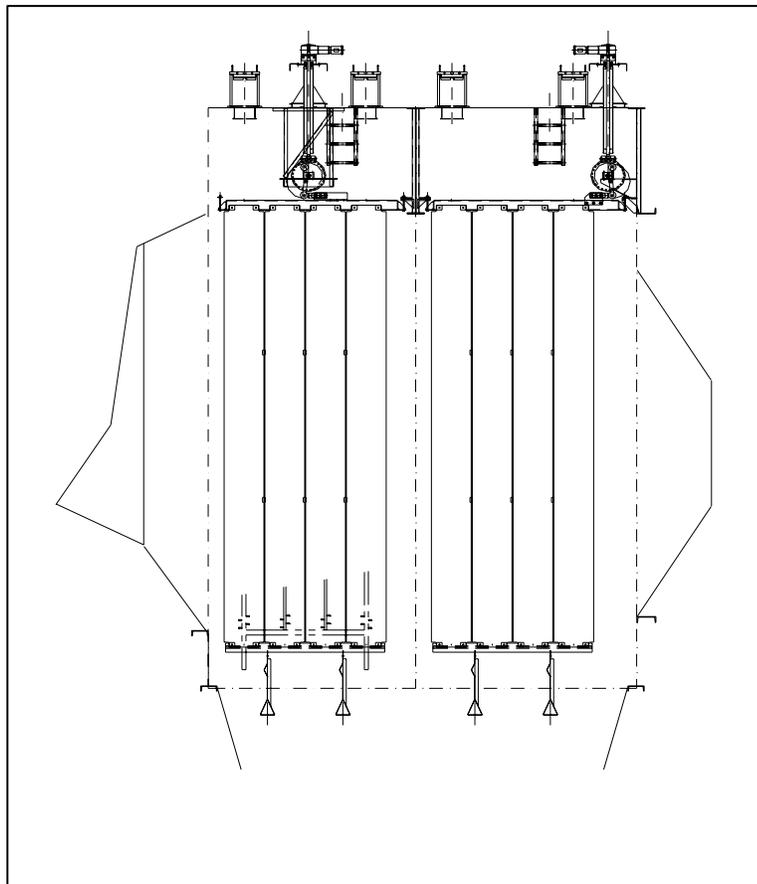
Los martillos están dispuestos en ángulos diferentes para que la sacudida de diferentes hileras de electrodos se realice sucesivamente y se minimice el re-arrastre del polvo.

Cuando un martillo caedizo golpea la barra de choque en una línea de electrodos, la energía del choque se distribuye en forma pareja a los diversos electrodos. La intensidad del choque se selecciona de manera que la onda generada en los electrodos cause un "efecto avalancha" y minimice así el re-arrastre del polvo.

Todas las piezas internas del sistema de golpeteo están colocadas por encima de los campos, donde son accesibles a la inspección y servicio a través de puertas de inspección en una zona con habitáculo de alrededor de 5 pies.

Placas deflectoras ubicadas entre el suelo plano de la carcasa del precipitador y los sistemas de electrodos y entre los electrodos colectores y las paredes laterales de la carcasa del precipitador impiden que el gas fluya fuera del sistema de electrodos.

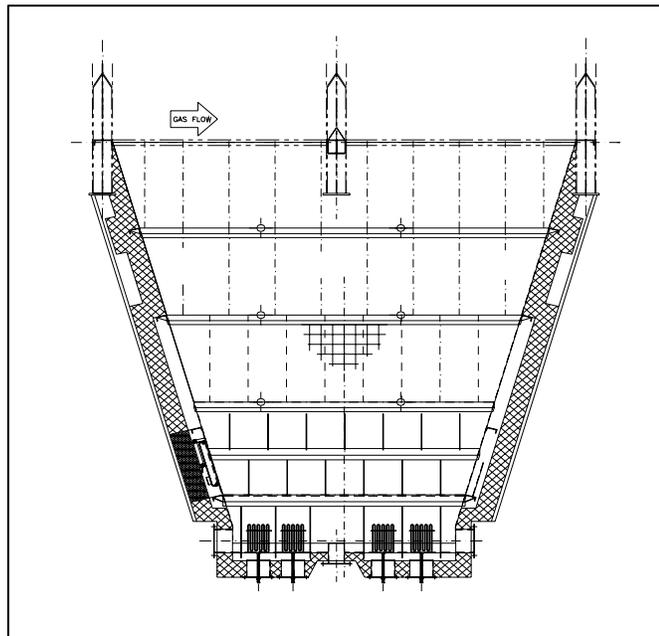
Figura 16. Mecanismo de golpeteo del colector de polvo



3.2.11 Calentamiento de tolvas inferiores

Las tolvas inferiores están equipadas con elementos calentadores para evitar la corrosión y la condensación de gases de combustión o aire durante los períodos de parada y puesta en marcha. El PLC reduce el calentamiento de las tolvas inferiores durante la operación estable.

Figura 17. Calefacción de tolvas inferiores



3.2.12 Sistemas rociadores

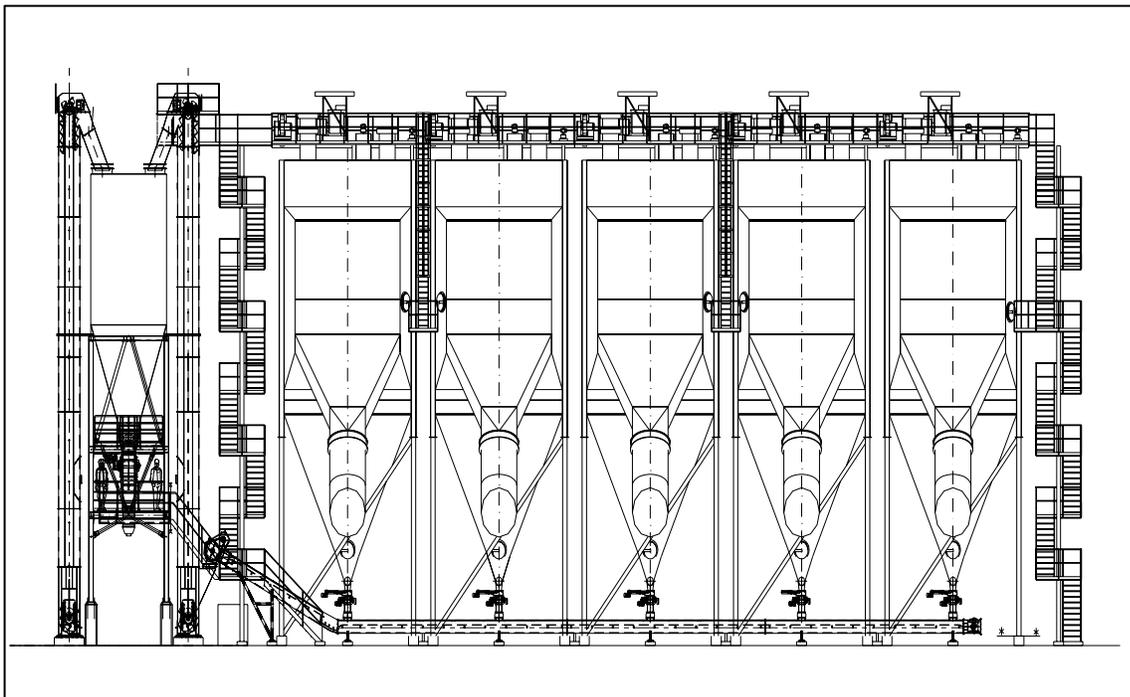
Los precipitadores electrostáticos y los silos están equipados con un sistema rociador que se encenderá automáticamente en condiciones de alta temperatura. El sistema controla la temperatura del precipitador electrostático y regula la válvula magnética instalada entre el suministro de agua y el sistema rociador anti- incendios. Si la temperatura sube por encima de un valor de ajuste predeterminado, los rectificadores se apagarán automáticamente y se abrirá la válvula magnética.

El agua fluye a través de toberas instaladas dentro del precipitador electrostático y vaporiza el fuego.

3.2.13 Sistema de transporte de polvo

El polvo recolectado se elimina de los electrodos mediante un mecanismo de golpeteo programado y cae en la tolva inferior del precipitador desde donde es llevado mediante un transportador de tornillo y válvulas rotativas hacia el transportador de cadena y elevador de cangilones hasta el silo de cenizas.

Figura 18. Sistema de transporte de polvo



3.2.14 Silo y sistema de descarga de polvo

El silo tiene el tamaño adecuado para almacenar el polvo recolectado durante una semana. El contenido del silo es medido continuamente por mediciones de nivel de silo.

El silo está equipado con un sistema de descarga de polvo, vibrador de descarga del silo, que incluye una compuerta manual deslizable en la parte inferior del silo, un alimentador de tornillo sin fin, válvula rotativa, humidificador de paletas dobles, bomba dosificadora de químicos, juego de válvulas y caños para inyección de agua y una manguera móvil para la descarga del polvo humedecido hacia el camión.

3.3 Datos técnicos del precipitador electrostático

Tabla VII. Datos del sistema de precipitadores electrostáticos

Número de cámaras	Piezas	10
Número de campos por cámara	Piezas	2
Material de las cámaras		Acero dulce
Tipo de fondo		Tolva prisma
Tolvas inferiores por cámara	Piezas	1
Potencia de rectificadores/ cámara		
campo 1 y 2	kV/mA	100/400
Valores típicos		
campo 1	kV/mA	25-100/50-200
campo 2	kV/mA	25-100/100-300
Electrodos emisores		
- tipo	Multipeak	
- dimensiones	mm	Ø 32 x 1,5

Continúa

Sistema de golpeteo del electrodo emisor		
- tipo de golpeteo	Martillo caedizo, golpeteo superior	
- ubicación del accionador del golpeteo		techo
- número de accionadores de golpeteo/campo	Piezas	1
Electrodos colectores		
- tipo	Placa perfilada	600 mm
- espesor de placa	mm	1,5
- área colectora/PE	m ²	1075
Sistema de golpeteo del electrodo colector		
- tipo de golpeteo	Martillo caedizo, golpeteo superior	
- ubicación del accionador del golpeteo		techo
- nro. de accionadores de golpeteo/campo	Piezas	1
Transportadores de tornillo		
- Transportadores de tornillo por cámara	Piezas	1
- número de accionadores por cámara	Piezas	1
- material		Acero al carbono

3.3.1 Especificación de partes del precipitador electrostático

Diez precipitadores electrostáticos, tipo seco placa-alambre consistentes de dos campos eléctricos en serie, básicamente están compuestos por:

- 1 Carcasa del precipitador de paneles prefabricados de acero dulce de 5 mm.
- 1 Tolva inferior de precipitador tipo prisma de paneles prefabricados de acero dulce de 5 mm.
- 1 Estructura de apoyo, diseñada para permitir toda la expansión térmica necesaria.
- 1 juego de pernos de anclaje para estructura de apoyo
- 1 Techo exterior de acero con paneles, construido en acero dulce pintado de 4 mm.
- 1 Juego de puertas de inspección con bisagras.
- 1 Juego de cajas de aislador.
- 2 Sistemas emisores como partes separadas con electrodos emisores de tipo multipeak rígido, aisladores de soporte de alta tensión y aisladores de manguito.
- 2 Mecanismos de golpeteo para los electrodos emisores con eje aislador incluyendo dispositivos de accionamiento con reductor de engranajes y motor.
- 2 Juegos de electrodos colectores con dispositivo de suspensión, espesor de placa de 1.5 mm.
- 2 Mecanismos de golpeteo para electrodos colectores, incluyendo dispositivo de accionamiento con reductor de engranajes y motor.
- 1 Sistema de limpieza por aire con ventilador y unidad de calentamiento para aisladores de soporte y ejes aisladores.
- 1 Juego de elementos calefactores para la tolva inferior.
- 1 Juego de elementos calefactores para aisladores de apoyo y ejes aislantes.
- 1 Embudo de entrada de paneles prefabricados para la carcasa del precipitador, construido de acero dulce de 5 mm.
- 1 Juego de placas de distribución (2 piezas) ubicadas a la entrada del precipitador.

3.3.2 Especificación de partes del sistema de control

20 Transformadores rectificadores (T/R) de alta tensión.

- 1 Unidad de terminal remota común para los T/R. Hay 4 unidades de RTU comunes para 10 PE's.
- 1 Centro de control de motores, común para los transportadores de tornillos sin fin, motores de golpeteo y calentadores. El centro de control de motor es común para los PE's.
- 1 Unidad de PLC incluyendo tarjetas de PLC y Software, programado y verificado en fábrica.
- 1 Juego de cables, para equipo de cableado.
- 1 Juego de interruptores locales de control de motores, para el sistema de transporte de polvo.
- 1 Juego de equipo auxiliar, el cual consistente de varas de puesta a tierra y señales, etc.
- 1 Unidad de ensayo del sensor de temperatura portátil común, para verificar el sensor de temperatura en el lugar. La unidad de prueba es común para todas las unidades de precipitador.

3.4 Descripción de contenido y monitoreo del precipitador electrostático

El precipitador electrostático (PE) se utiliza para eliminar las partículas del gas de combustión del motor diesel. Después de cada motor diesel hay un PE que tiene dos campos en serie. Cada campo tiene una unidad T/R, electrodos colectores, electrodos emisores, calentadores del aislador y calentadores de la tolva inferior.

El sistema de limpieza de aire caliente para todos los aisladores es común para dos campos. Un mecanismo golpeador limpia el polvo de los electrodos.

Tanto el mecanismo de golpeteo del electrodo colector como del emisor tienen su propio motor golpeador.

La ceniza volante eliminada es transportada desde el fondo del PE al silo de ceniza volante por medio de transportadores. El sistema de descarga permite vaciar el silo de ceniza volante, por ejemplo a camiones.

El sistema completo del precipitador electrostático incluye:

- Diez precipitadores electrostáticos
- Dispositivos del transporte de ceniza volante
- Silo de ceniza volante y sistema de descarga de silo
- Rociadores para unidades de PE y silo de ceniza volante
- Dos centros de control (CC) para unidades de T/R
- Dos centros de control de motor (MCC) para golpeadores, transportadoras, etc.
- PLC (controlador lógico programable) que controla todos los dispositivos que se incluyen en el precipitador electrostático.

Los centros de control para las unidades T/R, centro de control del motor y caja del PLC están ubicados en la misma sala cerca de las unidades PE.

Un centro de control incluye dispositivos de control para cinco unidades PE. El centro de control del motor 1 incluye dispositivos para el PE 1-5 y el centro de control del motor 2 incluye dispositivos para PE 6-10 y silo. El panel de control incluye tarjetas de PLC y un botón de reconfiguración de alarma para todos los dispositivos en el área del PE.

Los motores y unidades TR cuentan con interruptores de seguridad ubicados cerca del dispositivo. Los dispositivos de las unidades PE pueden ser controlados individualmente mediante interruptores de control local. Los interruptores de control local de los motores están ubicados cerca del dispositivo. Los interruptores de control local de los T/R se encuentran en las puertas del centro de control y los interruptores del calefactor en el MCC.

En la sala de control principal se observan pantallas que visualizan la zona del PE. En las pantallas se observan señales de alarma, estado, etc. El operador puede ver la razón de la alarma por medio de la exhibición en la pantalla (por un display). Es posible observar también la temperatura del gas dentro del PE y los valores eléctricos de las unidades TR.

La pantalla cuenta con un reconfigurador de alarma común para todos los dispositivos en la zona del PE.

Todos los dispositivos del PE dependientes del accionamiento de la unidad generadora arrancarán a partir de la información de funcionamiento de la unidad generadora. El operador puede ver cómo se realiza la puesta en marcha desde la pantalla. Si el dispositivo se detiene después del período de puesta en marcha se emite una señal hacia la sala de control. Se debe encontrar primero la razón de la parada y luego arreglar el problema.

El dispositivo se pondrá en marcha activando la reconfiguración de alarma desde la pantalla del monitor o desde la puerta de la caja del PLC. Si otros dispositivos se han detenido por esto, se pondrán también en marcha.

Cuando la unidad generadora se detiene, los dispositivos del PE relacionados al diesel parado se desconectan con cierta demora. El operador puede ver desde la pantalla del monitor la forma en que esto ocurre.

Cada PE tiene dos sensores de temperatura para detectar fuego en el PE. Los rociadores del PE se activan cuando las temperaturas superan el límite de parada. La unidad generadora y el PE se desconectan si se activa el rociador.

El silo de ceniza volante tiene dos sensores de temperatura para detectar fuego en el silo. El rociador del silo se activa cuando las temperaturas del silo son superiores al límite de temperatura de parada. La unidad generadora o el PE no se desconectan.

El silo tiene medición de nivel e interruptor de alto nivel. Los transportadores se detienen si se activan altos niveles del silo.

La descarga del silo se realiza en forma manual desde los interruptores de control local. El PLC controla todos los otros dispositivos de descarga excepto el fuelle de descarga.

3.4.1 Generalidades del control del precipitador electrostático

El sistema EPIC II (Controlador Integrado para Precipitador Electrostático) es un microprocesador de segunda generación basado en el sistema de control para PE.

El EPIC II consiste de dos componentes principales:

- Unidad principal EPIC II
- RTU (Remote Terminal Unit, Unidad Terminal Remota) utilizada como interfaz del operador

Cada PE tiene dos campos. En un campo hay una unidad TR (Transformador/ Rectificador) y dos mecanismos golpeadores.

Para una unidad TR hay un centro de control. El centro de control incluye un EPIC II utilizado para regular y controlar la energía eléctrica suministrada al PE. El EPIC II controla y monitorea los motores del mecanismo de golpeteo.

En la puerta del centro de control hay tres instrumentos indicadores, un selector y dos lámparas indicadoras. Los instrumentos indicadores son para voltaje primario, voltaje secundario y corriente secundaria para la unidad TR.

El selector tiene tres posiciones de funcionamiento; off-remote-on, las cuales se describen a continuación:

- OFF: la unidad TR está apagada y no se aceptan los controles a través de la comunicación con bus de campo (FläktBus)
- REMOTE: Se aceptan los controles a través del Fläktbus o PLC.
- ON: La unidad TR está encendida y no se aceptan los controles a través del Fläktbus o PLC.
- Lámparas indicadoras
- ON: La unidad de TR está encendida
- FAULT: Alarma común desde el EPIC II. Se puede ver la descripción de la alarma desde la RTU.

En la puerta de la caja de control hay un interruptor de enclavamiento a un PE La activación de este interruptor evita el encendido del motor diesel. El interruptor de enclavamiento se utiliza en el modo servicio del PE.

Una o más unidades RTU se utilizan para mostrar y reconfigurar las señales de alarma y disparo. La RTU se utiliza también para cambiar la configuración del EPIC II (Controlador Integrado para Precipitador Electrostático) y para el control local de la RTU y de los motores del mecanismo de golpeteo. La RTU está ubicada en la puerta del centro de control.

3.4.2 Unidades de TR

Las unidades TR cuentan con interruptores de seguridad. Para fines de servicio y mantenimiento existe un interruptor “REMOTE-OFF-MANUAL ON” en la puerta del centro de control de la unidad RT. Cuando el interruptor está en posición REMOTE se aceptan los controles desde la RTU y el PLC. En la posición ON y OFF no se aceptan los controles desde la RTU y el PLC. La unidad TR está ON u OFF dependiendo de la posición del interruptor.

El operador puede ver desde el monitor la señal de estado de la unidad TR, señales de corriente secundaria (mA) y el voltaje secundario (kV). Luego de cierto tiempo de experiencia en el PE, a partir de las señales de mA- y kV, el operador puede ver que el PE está funcionando adecuadamente. Las unidades de TR son mostradas en la RTU de la siguiente manera:

Tabla VIII. Despliegue de unidades de TR en la RTU

Unidad TR 1A YOQ011U001	Unidad TR 1B YOQ011U001
Unidad TR 2A YOQ021U001	Unidad TR 2B YOQ021U001
Unidad TR 3A YOQ031U001	Unidad TR 3B YOQ031U001
Unidad TR 4A YOQ041U001	Unidad TR 4B YOQ041U001
Unidad TR 5A YOQ051U001	Unidad TR 5B YOQ051U001

Continúa

Unidad TR 6A YOQ061U001	Unidad TR 6B YOQ061U001
Unidad TR 7A YOQ071U001	Unidad TR 7B YOQ071U001
Unidad TR 8A YOQ081U001	Unidad TR 8B YOQ081U001
Unidad TR 9A YOQ091U001	Unidad TR 9B YOQ091U001
Unidad TR 10A YOQ101U001	Unidad TR 10B YOQ101U001

3.4.2.1 Puesta en marcha

Las unidades TR se pondrán en marcha a partir de la información de funcionamiento de la unidad generadora. La información de funcionamiento de la unidad generadora está conectada eléctricamente al PLC del PE. Si las unidades no arrancan, ocúpese de los siguientes elementos.

1. Las unidades de TR tienen las siguientes señales de enclavamiento en el PLC. Si la señal de enclavamiento está activa, la unidad TR no arrancará y si la TR está encendida se detendrá.
 - El transportador uno ha estado en OFF durante más de 24 horas. Después de 12 horas el operador recibirá una alarma. Todo tiempo de parada del transportador aumenta el tiempo del contador a excepción que el transportador no funcione durante más de 30 minutos entre paradas. El contador de 24 horas es reconfigurado y la unidad TR puede ser puesta en marcha una vez que el transportador haya funcionado durante más de 30 minutos.
 - Las temperaturas de gas de ambos PE superan los 420 °C.
 - Se activa el sistema rociador.

2. La señal de parada de emergencia del motor diesel está conectada eléctricamente a los centros de control de las unidades TR. Si la señal de parada está activa no se pondrán en marcha las unidades.
3. El selector en la puerta de los centros de control no está en posición remota.
4. Las unidades TR tienen señal de parada local encendida o no ha sido reconfigurada.
5. La lámpara de falla está en ON en la puerta del centro de control. Desde la RTU se puede observar qué señal de parada está encendida. Cuando la unidad TR está en ON el EPIC II comienza a controlar los valores eléctricos de la unidad TR dentro de los límites ajustados. La secuencia de tiempo de los golpeadores también se pone en marcha cuando el PE se coloca en ON.

3.4.2.2 Parada

Cinco minutos después que el motor diesel se detiene las unidades de TR se desconectan (OFF). Las unidades TR se detendrán si:

6. Las señales de enclavamiento están activas debido a los siguiente;
 - El transportador uno ha estado en OFF durante más de 24 horas. Después de 12 horas el operador recibirá una alarma. Todo tiempo de parada del transportador aumenta el tiempo del contador a excepción que el transportador no funcione entre paradas durante más de 30 minutos. El contador de 24 horas es reconfigurado y la unidad TR puede ser puesta en marcha una vez que el transportador haya funcionado durante más de 30 minutos.

- Las temperaturas de gas de ambos PE superan los 420 °C.
 - Se activaron los rociadores.
7. La señal de parada de emergencia del motor diesel está conectada eléctricamente a los centros de control de las unidades TR. Si la señal de parada está activa las unidades se detendrán.
 8. Las unidades TR tienen señal de parada. La lámpara de falla está en ON en la puerta del centro de control. Desde la RTU puede observarse que la señal de parada está encendida. La señal de parada local puede ser por ejemplo alta temperatura de aceite en la unidad TR.

3.4.2.3 Enclavamientos a otros dispositivos

La señal de ON de la unidad TR pone en marcha la secuencia de tiempo de los golpeadores en el EPIC II.

3.4.3 Mecanismos de golpeteo

Los golpeadores tienen interruptores de seguridad. Las señales de control y realimentación de los motores del mecanismo golpeador están conectadas desde el centro de control al MCC. El control local de los golpeadores se realiza desde la RTU.

Los mecanismos de golpeteo se visualizan en la RTU tal y como se muestran en las Tablas IX y X.

3.4.3.1 Puesta en marcha y parada

La secuencia de control de los golpeadores se encuentra en el EPIC II y comienza cuando se enciende la unidad TR. Existe una puesta en marcha ajustable para cada aparato golpeador, repetición y tiempo de funcionamiento. Los tiempos y secuencia de tiempo se definen en la puesta en servicio.

Tabla IX. Despliegue de los mecanismos de golpeteo en el sistema emisor en la RTU

Golpeteo del electrodo de carga 1A	YOQ011M001
Golpeteo del electrodo de carga 1B	YOQ011M003
Golpeteo del electrodo de carga 2A	YOQ021M001
Golpeteo del electrodo de carga 2B	YOQ021M003
Golpeteo del electrodo de carga 3A	YOQ031M001
Golpeteo del electrodo de carga 3B	YOQ031M003
Golpeteo del electrodo de carga 4A	YOQ041M001
Golpeteo del electrodo de carga 4B	YOQ041M003
Golpeteo del electrodo de carga 5A	YOQ051M001
Golpeteo del electrodo de carga 5B	YOQ051M003
Golpeteo del electrodo de carga 6A	YOQ061M001
Golpeteo del electrodo de carga 6B	YOQ061M003
Golpeteo del electrodo de carga 7A	YOQ071M001
Golpeteo del electrodo de carga 7B	YOQ071M003
Golpeteo del electrodo de carga 8A	YOQ081M001
Golpeteo del electrodo de carga 8B	YOQ081M003
Golpeteo del electrodo de carga 9A	YOQ091M001
Golpeteo del electrodo de carga 9B	YOQ091M003
Golpeteo del electrodo de carga 10A	YOQ101M001
Golpeteo del electrodo de carga 10B	YOQ101M003

Tabla X. Despliegue de los mecanismos de golpeteo en el sistema colector en la RTU

Golpeteo del electrodo colector	1A	YOQ011M002
Golpeteo del electrodo colector	1B	YOQ011M004
Golpeteo del electrodo colector	2A	YOQ021M002
Golpeteo del electrodo colector	2B	YOQ021M004
Golpeteo del electrodo colector	3A	YOQ031M002
Golpeteo del electrodo colector	3B	YOQ031M004
Golpeteo del electrodo colector	4A	YOQ041M002
Golpeteo del electrodo colector	4B	YOQ041M004
Golpeteo del electrodo colector	5A	YOQ051M002
Golpeteo del electrodo colector	5B	YOQ051M004
Golpeteo del electrodo colector	6A	YOQ061M002
Golpeteo del electrodo colector	6B	YOQ061M004
Golpeteo del electrodo colector	7A	YOQ071M002
Golpeteo del electrodo colector	7B	YOQ071M004
Golpeteo del electrodo colector	8A	YOQ081M002
Golpeteo del electrodo colector	8B	YOQ081M004
Golpeteo del electrodo colector	9A	YOQ091M002
Golpeteo del electrodo colector	9B	YOQ091M004
Golpeteo del electrodo colector	10A	YOQ101M002
Golpeteo del electrodo colector	10B	YOQ101M004

Cada mecanismo golpeador tiene cuatro modos operativos de la siguiente forma:

1. El modo AUTO es el modo normal. Cuando la unidad TR está en ON el golpeador opera por secuencia de tiempo y cuando la unidad TR está en OFF el golpeador se detendrá. Si el mecanismo golpeador no se pone en marcha o no se detiene, el EPIC II accionará una alarma. La alarma puede verse en la sala de control y la razón de la alarma puede observarse desde la RTU.
2. En el modo ON el mecanismo de golpeteo funciona de acuerdo a la secuencia de tiempo pero en forma independiente del estado de la unidad TR.
3. En el modo OFF el mecanismo golpeador está desconectado. Si la unidad TR está en ON y el mecanismo golpeador en OFF durante más de 10 minutos se acciona una alarma. La alarma puede verse en la sala de control y la razón de la alarma puede verse desde la RTU.
4. El modo CONT es para el golpeteo continuo. Si el mecanismo golpeador está en ON durante más de 10 minutos se acciona una alarma. La alarma puede verse en la sala de control y la razón de la alarma puede verse desde la RTU.

El modo de los golpeadores puede cambiarse desde la RTU.

3.4.3.2 Enclavamientos a otros dispositivos

Los mecanismos golpeadores no tienen señales de control o enclavamiento a otros dispositivos.

3.4.4 Calentadores del aislador de PE's 1-10

Cada PE tiene dos grupos calefactores del aislador de 5 kW. En el MCC cada grupo calefactor tiene interruptor 1-0 y amperímetros. La condición de los elementos calefactores puede observarse desde los amperímetros. Los calentadores no tienen interruptores de seguridad.

Tabla XI. Despliegue de calentadores de aislador en la RTU

Calentador de aisladores de apoyo y eje 1A	YOQ011B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 1B	YOQ011B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 2A	YOQ021B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 2B	YOQ021B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 3A	YOQ031B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 3B	YOQ031B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 4A	YOQ041B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 4B	YOQ041B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 5A	YOQ051B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 5B	YOQ051B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 6A	YOQ061B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 6B	YOQ061B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 7A	YOQ071B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 7B	YOQ071B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 8A	YOQ081B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 8B	YOQ081B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 9A	YOQ091B001
Calentador de aisladores de apoyo y eje 9B	YOQ091B006
Calentador de aisladores de apoyo y eje 10A	YOQ101B001

3.4.4.1 Puesta en marcha y parada

Los calentadores se controlan sólo desde el MCC. Los calentadores deben encenderse 24 horas antes de encender la unidad TR.

Los calentadores siempre se mantienen en ON cuando del PE está en operación y también durante paradas de corta duración.

Si el grupo calefactor está en OFF durante más de 5 minutos mientras las unidades TR están operando, se activa una alarma en la sala de control. Las unidades TR no estarán en OFF cuando se activa la alarma.

3.4.4.2 Enclavamientos a otros dispositivos

Los calentadores del aislador no tienen señales de control o enclavamiento a otros dispositivos.

3.4.5 Calentadores de la tolva inferior PE's 1-10

Cada PE tiene dos grupos calefactores de la tolva inferior de 10 kW. En el MCC cada grupo calefactor tiene interruptor 1-0 y amperímetros. La condición de los elementos calefactores puede observarse desde los amperímetros. Los calentadores no tienen interruptores de seguridad.

Tabla XII. Despliegue calentadores de tolva inferior en la RTU

Calentadores de la tolva inferior 1A	YOQ011B001
Calentadores de la tolva inferior 1B	YOQ011B006
Calentadores de la tolva inferior 2A	YOQ021B001
Calentadores de la tolva inferior 2B	YOQ021B006
Calentadores de la tolva inferior 3A	YOQ031B001
Calentadores de la tolva inferior 3B	YOQ031B006
Calentadores de la tolva inferior 4A	YOQ041B001
Calentadores de la tolva inferior 4B	YOQ041B006
Calentadores de la tolva inferior 5A	YOQ051B001
Calentadores de la tolva inferior 5B	YOQ051B006
Calentadores de la tolva inferior 6A	YOQ061B001
Calentadores de la tolva inferior 6B	YOQ061B006
Calentadores de la tolva inferior 7A	YOQ071B001
Calentadores de la tolva inferior 7B	YOQ071B006
Calentadores de la tolva inferior 8A	YOQ081B001
Calentadores de la tolva inferior 8B	YOQ081B006
Calentadores de la tolva inferior 9A	YOQ091B001
Calentadores de la tolva inferior 9B	YOQ091B006
Calentadores de la tolva inferior 10A	YOQ101B001
Calentadores de la tolva inferior 10B	YOQ101B006

3.4.5.1 Puesta en marcha

Los calentadores de la tolva inferior se encienden desde el PLC cuando la unidad generadora no está funcionando o una unidad de TR está en ON. Sólo se da una señal de control desde el PLC a ambos grupos calefactores. Las señales de control y monitoreo están conectadas eléctricamente dentro del MCC de manera que ambos grupos calefactores funcionen correctamente. Si los calefactores no están en ON observe los siguientes elementos.

1. El modo de control de calentamiento está en automático.
2. La alarma desde el MCC no está activa.

3.4.5.2 Parada

Los calentadores se desconectan cuando la unidad generadora funciona y las temperaturas de los PE son > 300 °C durante 30 minutos. Si los comandos de puesta en marcha y parada están en ON simultáneamente en el PLC el comando STOP tiene una ligera superioridad. Si los calentadores no pasan a OFF ver el modo de control. Los calentadores pasarán a OFF si:

3. La alarma desde el MCC está activa.

Después de 5 minutos se acciona la alarma si el grupo calefactor no está en ON y el motor diesel no está en funcionamiento.

3.4.5.2 Enclavamiento a otros dispositivos

Los calentadores de la tolva inferior no tienen señales de control o enclavamientos a otros dispositivos.

3.4.6 Ventiladores de limpieza por aire caliente y unidades calefactoras del 1-10

Cada PE está provisto con un sistema de limpieza por aire caliente para mantener los aisladores limpios mediante el soplado continuo de aire limpio calentado hacia los compartimientos del aislador. El sistema incluye batería de calefacción y dos termostatos de control.

Los ventiladores de limpieza por aire tienen interruptores de seguridad e interruptores de control local. Cada interruptor es para el funcionamiento local, 1-0, automático. El ventilador tiene un contador de tiempo de funcionamiento en el MCC.

La batería de calefacción no tiene interruptores de seguridad o de control. La batería de calentamiento está dividida en tres grupos de 15 kW. En el MCC hay amperímetros para monitorear la condición de los elementos de calefacción. La batería tiene dos termostatos de protección térmica.

Si el termostato está activado debe ser reconfigurado manualmente. La alarma de la batería calefactora se acciona cuando se activa el termostato de protección o uno de los fusibles de suministro del grupo calefactor se ha accionado.

El termostato de control tiene un termostato capilar de dos etapas. Dentro del termostato hay una escala para configurar el punto de conmutación de temperatura S1.

El segundo punto de conmutación S2 es el primer punto de conmutación S1 +/- histéresis. La histéresis se ajusta dentro del termostato con un tornillo hexagonal de cabeza hueca.

Tabla XIII. Despliegue de ventiladores de limpieza y unidades calefactoras en la RTU

Ventilador de limpieza por aire caliente 1	YOQ011M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 1	YOQ011B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 2	YOQ021M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 2	YOQ021B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 3	YOQ031M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 3	YOQ031B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 4	YOQ041M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 4	YOQ041B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 5	YOQ051M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 5	YOQ051B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 6	YOQ061M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 6	YOQ061B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 7	YOQ071M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 7	YOQ071B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 8	YOQ081M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 8	YOQ081B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 9	YOQ091M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 9	YOQ091B019
Ventilador de limpieza por aire caliente 10	YOQ101M008
Unidad calefactora de limpieza por aire caliente 10	YOQ101B019

3.4.6.1 Arranque

El ventilador de limpieza por aire caliente se pone en marcha cuando está en funcionamiento el motor diesel.

Si el ventilador no arranca observar lo siguiente:

1. El ventilador de limpieza por aire caliente tiene las siguientes señales de enclavamiento en el PLC. Si la señal de enclavamiento está activa, el ventilador no arrancará y si el ventilador está en ON se apagará.
 - La temperatura 1 y 2 del PE es > 420 °C
2. El modo control está en automático.
3. La alarma desde el MCC no está activa.

El control del grupo calefactor se realiza en el MCC. La información de funcionamiento desde el ventilador libera el control del termostato de los grupos calefactores. El primer grupo calentador arranca cuando la temperatura es $< L1$, el segundo grupo calefactor arranca cuando la temperatura es $< L2$ y el tercer grupo calefactor arranca cuando la temperatura es $< L3$.

La configuración del límite L1 se realiza en el termostato 1. La configuración del límite L2 se realiza en el termostato 2. La configuración del límite L3 se realiza en el termostato 2 por el grado de histéresis menor del límite 2. Los límites L1 y L2 se ajustan durante el período de prueba.

Si se activa la protección térmica de la batería calefactora, los calefactores se desconectan y se acciona una alarma hacia la sala de control.

3.4.6.2 Parada

El ventilador de limpieza por aire caliente se detiene cuando el motor diesel no funciona y ambas unidades de TR han estado en OFF durante 10 minutos. El ventilador se detendrá si:

4. Las señales de enclavamiento están activas
 - La temperatura del PE 1 y 2 son > 420 °C
5. La alarma desde el MCC está activa.

Los calentadores se desconectan cuando el ventilador de limpieza por aire no está encendido. El control se realiza en el MCC. Si el ventilador de limpieza por aire caliente no está en ON cuando la unidad TR se pasa a ON, se acciona una alarma luego de 5 minutos.

3.4.6.3 Enclavamientos a otros dispositivos

El ventilador en ON está conectado eléctricamente a otros grupos calefactores.

3.4.7 Limpieza por aire para el ventilador de cajas de sello y unidad calefactora

La limpieza por aire para el sistema de cajas de sello se realiza presurizando los transportadores de cadena 16, 26 y los elevadores de cangilones 17, 27 y el aire también se pasa por los caños hasta los cojinetes de las válvulas 1-10.

El sistema incluye un ventilador, batería calefactora y un termostato de control. La limpieza por aire para el ventilador de las cajas de sello opera con dos velocidades de rotación. Las velocidades están controladas por el convertidor de frecuencia.

La limpieza por aire para el ventilador de las cajas de sello cuenta con un interruptor de seguridad y un interruptor de control local para el funcionamiento local, automatización 1-0. La corrida local arranca el ventilador con velocidad 2. El ventilador tiene un contador de tiempo de funcionamiento en el MCC y un convertidor de frecuencia en la sala de MCC.

La batería calefactora no tiene interruptores de seguridad o de control La batería calefactora está dividida en tres grupos de 4 kW. El MCC tiene amperímetros para monitorear la condición de los elementos calefactores. El termostato de control es un termostato capilar de dos etapas.

Dentro del termostato hay una escala para configurar el punto de conmutación de temperatura S1. El segundo punto de conmutación S2 es el primer punto de conmutación S1 +/- histéresis. La histéresis se ajusta dentro del termostato mediante un tornillo hexagonal de cabeza hueca.

Tabla XIV. Despliegue de la limpieza por aire para ventilador y unidad calefactora de las cajas de sello en la RTU

Limpeza por aire para ventilador de cajas de sello YOQ901M003
Limpeza por aire para la unidad calefactora de las cajas de sello YOQ901B001

3.4.7.1 Puesta en marcha

La limpieza por aire para el ventilador de las cajas de sello arranca con una velocidad 1 cuando al menos un motor diesel está en ON. La velocidad de rotación 2 está en ON cuando cinco motores diesel o más están en ON.

La velocidad de rotación 2 está en OFF cuando el comando ON de velocidad 2 no está encendido. Si el ventilador no arranca verifique lo siguiente:

1. La limpieza por aire para el ventilador de las cajas de sello tiene las siguientes señales de enclavamiento. Si la señal de enclavamiento está activa el ventilador no arrancará y si el ventilador está encendido se detendrá.
 - Temperatura 1 y 2 del Silo > 200 °C
2. El modo de control es automático.
3. La alarma desde el convertidor de frecuencia no está activa.

El control de los grupos calentadores se realiza en el MCC. La información de funcionamiento del ventilador arranca el primer grupo calefactor. El segundo grupo calefactor arranca cuando la temperatura es < L1 y el tercer grupo calefactor arranca cuando la temperatura está en un grado de histéresis inferior a L1 se ajusta durante el período de prueba.

3.4.7.2 Parada

Normalmente el ventilador de limpieza por aire para las cajas de sello se detiene cuando todos los motores diesel han estado desconectados durante 5 minutos.

El ventilador de limpieza por aire para las cajas de sello parará si:

4. La señal de enclavamiento está activa
 - La temperatura 1 y 2 del silo > 200 °C
5. La alarma del convertidor de frecuencia está activa.

Si el ventilador de limpieza por aire para las cajas de sello no está en ON cuando como mínimo un motor diesel está en ON, se accionará una alarma a los 5 minutos.

Los calentadores se desconectan cuando el ventilador de limpieza por aire para las cajas de sello no está encendido. El control se realiza en el MCC.

3.4.7.3 Enclavamientos a otros dispositivos

El ventilador en ON está eléctricamente conectado a otros grupos calefactores.

3.4.8 Transportadores de tornillo del 1-10

Hay un transportador de tornillo en el fondo de cada PE. Los transportadores de tornillo tienen interruptores de seguridad y dos interruptores de control local. El primer interruptor de control es para la selección del modo de control, local – 0-automático.

El segundo interruptor es para el funcionamiento local, hacia delante o hacia atrás. Los transportadores de tornillo tienen protecciones de rotación conectadas eléctricamente al MCC. Los transportadores de tornillo tienen un contador de tiempo de funcionamiento en el MCC.

Tabla XV. Despliegue de transportadores de tornillo en la RTU

Transportador de tornillo 1	YOQ011M005
Transportador de tornillo 2	YOQ021M005
Transportador de tornillo 3	YOQ031M005
Transportador de tornillo 4	YOQ041M005
Transportador de tornillo 5	YOQ051M005
Transportador de tornillo 6	YOQ061M005
Transportador de tornillo 7	YOQ071M005
Transportador de tornillo 8	YOQ081M005
Transportador de tornillo 9	YOQ091M005
Transportador de tornillo 10	YOQ101M005

3.4.8.1 Puesta en marcha

El transportador de tornillo arrancará cuando la válvula de compuerta deslizante esté abierta y la unidad generadora de diesel en funcionamiento. Si el transportador no arrancara observar lossiguientes:

1. El transportador de tornillo tiene las siguientes señales de enclavamiento en el PLC. Si la señal de enclavamiento está activa el transportador no arrancará y si el transportador está encendido se detendrá.
 - La válv. de compuerta deslizante no está OPEN (ABIERTA)
 - La válvula rotativa no está en ON
 - Ambas temperaturas de gas del PE superan los 420 °C
2. El modo de control del transportador de tornillo está en automático.
3. La alarma desde el MCC no está activa.

3.4.8.2 Parada

El transportador de tornillo se detiene normalmente cuando las unidades TR han estado en OFF durante 30 minutos y la unidad generadora no está en funcionamiento.

El transportador de tornillo se detendrá si:

La señal de enclavamiento está activa

- La válv. de compuerta deslizante no está OPEN (ABIERTA)
- La válvula rotativa no está en ON
- Ambas temperaturas de gas del PE superan los 420 °C

La protección de rotación ha estado activa.

La alarma desde el MCC está activa.

3.4.8.3 Enclavamientos a otros dispositivos

La alarma se acciona si la unidad TR del PE está en ON y el transportador no está ON durante 12 horas. Si el transportador no arranca durante 24 horas, la unidad TR se detiene. La unidad TR puede arrancarse luego de 30 minutos de funcionamiento del transportador.

3.4.9 Válvulas de compuerta deslizante de 1-10

Hay una válvula de compuerta deslizante después de cada transportador para cerrar el PE del transporte de polvo común.

Las válvulas de compuerta deslizante tienen interruptores de seguridad y dos interruptores de control local.

El primer interruptor de control es para la selección del modo de control, local – 0-automatico. El segundo interruptor es para el funcionamiento local, abierto o cerrado.

Las válvulas de compuerta deslizante cuentan con interruptores inductivos de posición cerrada y abierta.

Los interruptores de posición están conectados eléctricamente al MCC donde son multiplicados para el circuito de control de las válvulas y para el PLC.

Tabla XVI. Despliegue de válvulas de compuertas deslizante en la RTU

Válv. de compuerta deslizante 1	YOQ011M006
Válv. de compuerta deslizante 2	YOQ021M006
Válv. de compuerta deslizante 3	YOQ031M006
Válv. de compuerta deslizante 4	YOQ041M006
Válv. de compuerta deslizante 5	YOQ051M006
Válv. de compuerta deslizante 6	YOQ061M006
Válv. de compuerta deslizante 7	YOQ071M006
Válv. de compuerta deslizante 8	YOQ081M006
Válv. de compuerta deslizante 9	YOQ091M006
Válv. de compuerta deslizante 10	YOQ101M006

3.4.9.1 Válvula abierta

Cuando la válvula de compuerta deslizante esté abierta y la unidad generadora en ON. Si la válvula de compuerta deslizante no arranca, observar los siguientes:

1. La válvula de compuerta deslizando tiene las siguientes señales de enclavamiento en el PLC. Si la señal de enclavamiento está activa la válvula de compuerta deslizando no se abrirá y si la válvula de compuerta deslizando está abierta se cerrará.
 - La válvula rotativa está en ON
 - Ambas temperaturas de gas del PE superan los 420 °C
2. El modo control de la válvula de compuerta deslizando está en automático.
3. La alarma desde el MCC no está activa.

3.4.9.2 Válvula cerrada

Normalmente, la válvula de compuerta deslizando está cerrada cuando el convertidor y motor de combustión no están en funcionamiento. La válvula de compuerta deslizando se cerrará si:

4. La señal de enclavamiento está activa
 - La válvula rotativa está en ON
 - Ambas temperaturas de gas del PE superan los 420 °C

La alarma desde el MCC evita el cierre o apertura de la válvula de compuerta deslizando. El comando de falla del MCC entre abierta y cerrada detiene el movimiento de la válvula de compuerta deslizando.

3.4.9.3 Enclavamientos a otros dispositivos

Si la válvula de compuerta deslizando está abierta y la unidad generadora está en funcionamiento el transportador arrancará. Si la posición abierta desaparece, el transportador se detendrá.

3.5 Instrucciones para la operación normal

3.5.1 Parámetros críticos de operación

Cuando se pone en marcha el motor diesel, el precipitador electrostático y el sistema de transporte de polvo se pondrán en marcha automáticamente.

Si esto no ocurriera, el monitor del sistema de control mostrará una alarma y se tomarán las medidas necesarias para corregir el problema.

Si el precipitador electrostático no se pone en marcha automáticamente, salir del panel de RTU (Unidad Terminal Remota) para la puesta en marcha manual en la puerta de la caja de control del precipitador. Siguiendo las instrucciones (véase incisos 3.4.2 y 3.4.3) es posible poner en marcha rectificadores y el sistema golpeador.

En la puerta de la caja hay un interruptor de control operado manualmente 0-REMOTE-1. Al girar este interruptor a la posición “1”, el precipitador (rectificadores y sistema de golpeteo) se pondrá en marcha inmediatamente. Esta será la acción final si la RTU no responde porque el interruptor pasa por alto (by-pass) todas las alarmas de advertencia de los rectificadores y sistema de golpeteo.

Los calentadores del aislador y los calentadores de la tolva inferior pueden ponerse en marcha mediante los interruptores de control en la puerta del MCC (auxiliares). Hay un interruptor para cada grupo calefactor y al llevarlos a la posición “ON” o “1” se pueden encender los calefactores. Controlar el éxito de su puesta en marcha observando los valores de los medidores de corriente (medidores A) de los grupos calefactores en la puerta del MCC.

Observar que los calefactores deben estar encendidos todo el tiempo, incluso durante paradas cortas (menos de 2 días). Observar que los calefactores deben estar encendidos como mínimo 24 horas antes de poner en marcha el precipitador (rectificadores).

El sistema de transporte de polvo puede ser puesto en marcha en forma manual mediante los interruptores de control local ubicados cerca de los transportadores en campo. Cada transportador tiene dos interruptores de control local. Uno permite seleccionar el modo AUTO-LOCAL y el otro la dirección FORWARD-REVERSE.

Observar que algunos transportadores tienen sólo una posibilidad de control de dirección (interruptor). Una vez puesto en marcha el precipitador, los siguientes transportadores deben estar en funcionamiento:

- Transportador de tornillo del precipitador específico
- Válvula de compuerta deslizante del precipitador específico
- Alimentador rotativo del precipitador específico
- transportador de cadena 16 ó 26 dependiendo del precipitador y su ubicación.
- elevador de cangilones 17 ó 27 dependiendo del precipitador y su ubicación.

3.6 Instrucciones para la puesta en marcha

3.6.1 Puesta en marcha luego de una parada de larga duracion

Cuando se arranca el motor de combustion interna, el precipitador electrostático y el sistema de transporte de polvo se pondrán en marcha automáticamente.

Como mínimo 24 horas antes de la puesta en marcha planificada, encender las resistencias calentadoras de las cajas del aislador y sistema de golpeteo del sistema

emisor, ubicadas en la sala de equipo auxiliar. Verificar que los medidores muestren valores normales. Antes de poner en marcha el precipitador electrostático, verificar:

1. Que las tapas de los compartimentos del aislador estén cerradas y con llave.
2. El nivel de aceite de los rectificadores de alta tensión.
3. El nivel de aceite de los motores de engranajes de los aparatos de golpeteo del sistema emisor de chispas.
4. El nivel de aceite de los motores de engranajes de los aparatos de golpeteo del sistema colector de polvo.
5. Que la carcasa del precipitador esté libre de herramientas y otros instrumentos ajenos al lugar.

3.6.2 Puesta en marcha luego de una parada normal

Luego de verificar las medidas tomadas anteriormente, poner en marcha la maquinaria desde la sala de control (si no se arranca automáticamente con un motor de combustion):

1. Poner en marcha el sistema de transporte de polvo.
2. Poner en marcha la unidad T/R

Nota: Los aparatos de golpeteo arrancan automáticamente por un programa controlado.

Poner en marcha los rectificadores del precipitador desde la sala de control:

3. Girar el interruptor principal del rectificador a la posición "1".
4. Poner en marcha el rectificador desde la RTU en el panel de control.

Tras la puesta en marcha, revisar desde los medidores que el voltaje del precipitador suba como mínimo a 20 kV y la corriente, como mínimo 100 mA.

3.7 Instrucciones de parada

3.7.1 Medidas a tomar antes de la parada

Cuando el motor de combustión se detiene, el precipitador electrostático y el sistema de transporte de polvo se detendrán automáticamente, realizar lo siguiente:

1. Desconectar los rectificadores de alta tensión.
2. Después de desconectar la tensión, hacer funcionar los aparatos de golpeteo y el transportador de polvo durante aproximadamente 30 min. (Los aparatos de golpeteo se detendrán automáticamente una vez transcurrido el tiempo de demora controlada de 30 min.).
3. Girar los interruptores principales del rectificador en el centro de control a posición "0".
4. En caso de parada larga o trabajo de mantenimiento, extraer los fusibles y colgar un cartel de advertencia "hombres trabajando".
5. Detener los mecanismos de golpeteo.
6. Detener el equipo de transporte de polvo.
7. En caso de trabajo de mantenimiento relacionado con el precipitador o los auxiliares del precipitador, colgar un cartel de advertencia de "hombres trabajando" en los centros eléctricos.
8. Después haber completado las medidas dictadas, el precipitador está eléctrica y mecánicamente desconectado.
9. Si desea ingresar al precipitador, ver los reglamentos de seguridad.

3.7.2 Verificaciones de respaldo

1. Verificar desde los medidores de mA y kV del rectificador que el funcionamiento de los rectificadores sea estable. Estos medidores están situados en la sala eléctrica del precipitador, en las puertas de los controles de los rectificadores. Se puede verificar también desde el monitor del PLC. Los valores típicos para el campo 1 son 50-200 mA y 25-100 kV y para el campo 2 100-300 mA y 25-100 kV.
2. Verificar que la limpieza del PE funcione en períodos de 10-30 minutos de acuerdo a los valores determinados durante el período de puesta en servicio.
3. Verificar de tanto en tanto el polvo que cae del alimentador rotativo. Esto se puede realizar utilizando un equipo de muestreo.
4. Verificar que los medidores de amperios de elementos térmicos muestren valores normales.
5. Todas las variaciones en el funcionamiento del precipitador deben figurar en un cuaderno de registro para posterior examen.
6. **¡Atención!** Se prohíbe el funcionamiento continuo de los aparatos de golpeteo descuidando el programa de golpeteo, ya que puede generar emisiones de polvo considerablemente mayores y acelerar el desgaste mecánico del precipitador electrostático.

3.7.3 Ajustes del rectificador

Los rectificadores trabajan según la posición ajustada por el controlador EPIC II.

Al poner en marcha los rectificadores, el aparato de golpeteo se arrancará por medio de un programa en una secuencia específica.

Durante el funcionamiento normal, los primeros rectificadores en la corriente de salida de gas funcionan en un nivel de mA y kV un poco menor, aproximadamente 50-80 % de su valor máximo, dependiendo de la carga del motor diesel. En la sección del precipitador dispuesto por el primer rectificador suele haber lo que se llama cortocircuito con desprendimiento de chispas. Entonces los A, mA y kV están un tanto agitados, aproximadamente 10-50 chispas soltadas/minuto. Esto es totalmente normal.

En la segunda sección del precipitador, los valores del rectificador son bastante cercanos a los valores máximos durante la operación normal, pero puede haber chispeo también en esta sección, aunque bastante inferior.

3.8 Transtornos de funcionamiento

3.8.1 Derterminación de lecturas

Durante el funcionamiento se puede localizar una gran parte de los defectos leyendo e interpretando los valores de los medidores de A, kV y mA. Estos medidores están colocados en las cajas del EPIC incluidas en el equipo de control. Los valores también pueden ser leídos en la pantalla de las computadoras en la sala de control, aunque desde ahí no es posible realizar cambios en los parámetros de funcionamiento del precipitador. Los cambios sólo pueden realizarse desde el panel RTU instalado en la puerta de la caja de mando del T/R. (EPIC).

3.8.2 Desviaciones en los medidores

Fig. 19 & 20 Hay un cortocircuito en el precipitador. Esto puede deberse a un electrodo emisor roto que ha quedado contra una placa colectora o posibles restos de polvo, causando el cortocircuito del sistema. Poner en funcionamiento los aparatos de golpeteo durante aproximadamente una hora, ya que esto puede eliminar la causa del cortocircuito.

Fig. 21 Hay un defecto en la derivación del rectificador midiendo la señal de mA, o un punto roto en el cable de señal a la caja eléctrica. Revisar la derivación y el cable.

Fig. 22 Probablemente hay un punto roto en el tubo del alimentador desde el rectificador al aislador de manguito. Revisar abriendo la puerta del tubo protector entre el rectificador y el compartimento del aislador. No olvidarse de desconectar y conectar a tierra.

Fig. 23 Probablemente haya un puente de polvo entre los sistemas de electrodos o los aparatos de golpeteo no están en funcionamiento. Revisar el funcionamiento de los aparatos de golpeteo colocándose detrás de los motores de engranajes y escuchando el ruido de los martillos al golpear cuando el eje gira.

Si no se oye golpeteo, probablemente el eje aislador estará roto (golpeteo del sistema emisor) o el espacio de holgura es tan grande que el enganche entre el eje aislante y el aparato de golpeteo está girando libremente. Se puede revisar subiendo el accionador del aparato de golpeteo para ver el eje aislador.

Fig. 24 Valores normales para el segundo, tercero y último campo. Incluso si el motor diesel está funcionando con carga máxima hay salto de chispas.

Fig. 25 Valor normal para el primer campo. Siempre hay una gran cantidad de desprendimiento de chispas, ya que el primer campo normalmente recoge el 70-80 % del polvo.

Fig. 19
Cortocircuito en el lado secundario
(dentro del precipitador).
Durante la prueba de cortocircuito.

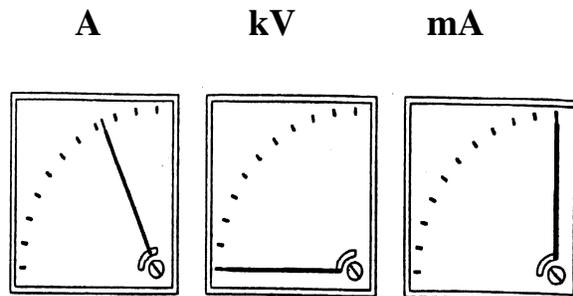


Fig. 20
Cortocircuito en el lado secundario(dentro del precipitador)
con configuración normal del EPIC.

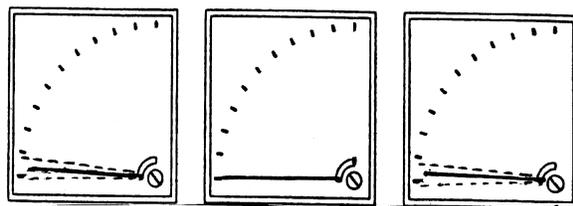


Fig. 21
Cortocircuito en el circuito de
medida mA.

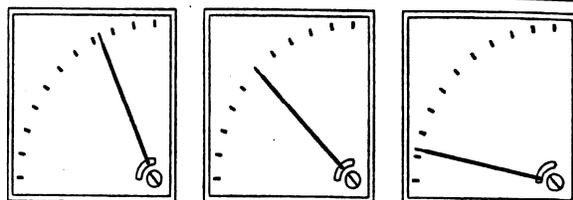


Fig. 22
Punto roto en el lado de alta tensión
(tubo alimentador roto).

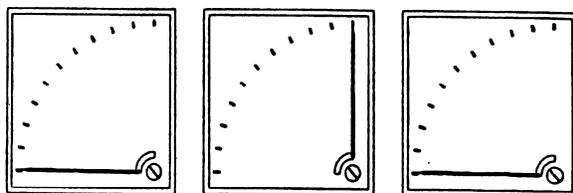


Fig. 23
Puente de polvo entre los sistemas de
electrodos, eje aislante roto.

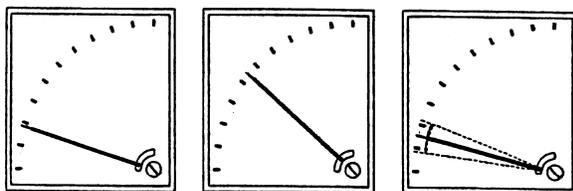


Fig. 24
Valores normales para el segundo,
tercero y último campo
25-100 kV/100-300 mA

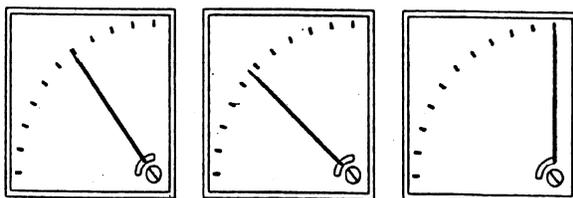
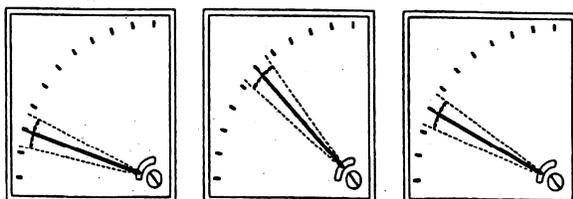


Fig. 25
Valor normal para el primer campo.
25-100 kV/50-200 mA



3.9 Guía de mantenimiento predictivo del precipitador electrostático

1. Una vez al año se deberá detener el precipitador, limpiar todas las unidades e inspeccionar el desgaste y la corrosión para realizar todos los cambios posibles.
2. Revisar que las tapas de los compartimentos aisladores y las puertas de inspección del precipitador no estén dañadas y que los sellos estén en buen estado. Reemplazar sellos endurecidos.
3. Verificar la resistencia a tierra de las conexiones a tierra del precipitador como mínimo una vez al año. Al mismo tiempo verificar que las conexiones a tierra estén protegidas contra daño químico o mecánico.
4. Revisar todas las conexiones de todos los conectores y relés al menos una vez al año. Si fuera necesario, ajustar o reemplazar las conexiones.
5. Durante las paradas de mantenimiento es conveniente verificar la operación de los reguladores de alta tensión. Revisar la operación después de haber completado el trabajo en el precipitador y cuando todas las puertas del precipitador estén cerradas.
6. Poner en marcha las unidades de alta tensión del precipitador considerando las normas de seguridad
7. Probar la operación de los reguladores, en cada campo por separado, por medio de tres valores diferentes de corriente secundaria (por ejemplo, 20 %, 50 % y 100 % de la corriente secundaria). Modificar el límite de corriente desde la terminal RTU y observar que la corriente primaria y la corriente secundaria estén de

acuerdo a las verificaciones de respaldo y en sus valores nominales cuando la corriente secundaria esté en 100 %.

8. Operar los rectificadores de alta tensión durante alrededor de 10 minutos y luego detenerlos con precaución.

3.9.1 Inspecciones a realizar para detectar posibles fallas o averías

3.9.1.1 Carcasa del precipitador

- Depósitos excesivos de polvo y razones de ello.
- Revisar los conductos de entrada y salida de posibles corrosiones.
- Verificar las juntas y que las puertas de inspección estén bien herméticas.

3.9.1.2 Compartimientos de los aisladores

- Revisar la situación de los aisladores.
- Se admiten pequeñas grietas si el aislador está limpio y la grieta no tiene hendiduras profundas.
- Revisar que los elementos térmicos no estén dañados.
- Verificar las juntas y que las cubiertas del aislador estén bien herméticas.
- El aislador no debe estar en contacto con piezas de hierro.

3.9.1.3 Limpieza con aire caliente

- Revisar el filtro de entrada de aire en el ventilador una vez por mes.
- Si fuera necesario, limpiar con aire a presión o reemplazar el filtro por uno nuevo.
- Verificar estanqueidad y oxidación de terminales.

3.9.1.4 Placa de distribución de gas

- Extraer los restos de polvo de la entrada de gas y de la placa de distribución de gas del precipitador.
- Si hay restos inusuales de polvo en la placa, examinar las razones posibles.

3.9.1.5 Sistema de electrodos emisores

- Verificar la distancia entre los electrodos emisores y los colectores. Los electrodos emisores deben estar centrados con respecto a los electrodos colectores. Tolerancia normal ± 10 mm.
- Si se encuentran restos inusuales de polvo en los electrodos emisores, examinar las razones posibles. Extraer electrodos emisores (si los hubiera) y reemplazarlos.
- Revisar que los ejes del aislador de los aparatos de golpeteo del sistema emisor no estén dañados.
- Verificar que el accionamiento desde el motor de engranajes de tornillo sin fin hasta el eje de los martillos trabaje adecuadamente.
- Verificar que todos los martillos caedizos funcionen y no tiendan a quedarse trabados.

3.9.1.6 Sistema de electrodos colectores de polvo

- Si se encuentran restos inusuales de polvo en los electrodos colectores, examinar las razones posibles.
- Revisar que el respectivo motor de golpeteo y reductor estén conectados entre sí.

- Revisar que todos los mecanismos de martillos funcionen y no tiendan a quedarse trabados.
- Revisar que los mecanismos de martillos golpeen en la mitad de las barras de choque y que no haya grietas.
- Verificar que los yunques de choque no estén dañados.

3.9.1.7 Accionamiento del golpeteo

- Ajustar los pernos del prensaestopas. Si no quedara margen de abrazado, reemplazar la junta.
- Verificar nivel de aceite.
- Buscar fugas en la unidad de engranajes.

3.9.1.8 Sistema rociador

- Desconectar las mangueras de las barras rociadoras.
- Verificar que las mangueras no estén dañadas.
- Desconectar el ensamble de barra rociadora y retirarla del precipitador electrostático.
- Verificar y limpiar las toberas.
- Cerrar la válvula manual entre las válvulas solenoide y el ramal de riesgo.
- Destornillar uno de los elementos calefactores del precipitador electrostático.
- Verificar la operación del sistema rociador calentando el elemento de temperatura con un horno portátil.
- Verificar que la válvula magnética abra a la temperatura especificada y el agua fluya de acuerdo al tiempo especificado.
- Volver a ensamblar todos los elementos del sistema rociador y asegurar las conexiones.

3.9.1.9 Rectificador de alta tensión

- Revisar el nivel de aceite del rectificador una vez por mes.
- Para minimizar los riesgos de temperatura excesiva, limpiar los elementos refrigerantes y los lados del depósito siempre que sea necesario, y como mínimo anualmente.
- Para evitar daños a componentes de alta tensión, comprobar la condición aisladora del aceite cada 5 años.
- El indicador de nivel de aceite detecta grandes fugas de aceite e indica alarma de gas, por lo cual se deben realizar inspecciones visuales periódicamente.

3.9.1.10 Sistema de bajo voltaje

- Verificación de la conducción del conductor a tierra luego de 3-7 años.
- Verificación de la condición y configuración de la protección de sobrecorriente después de 5 años.
- Verificación de la puesta a tierra interna del tablero de control.
- Revisar cámaras de rotura
- Verificar el estado de las cuchillas de puesta a tierra
- Revisar físicamente los imanes y serpentines
- Revisar el estado de enclavamientos y contactos auxiliares
- Verificar el estado de los aislantes

4 ESTUDIO ECÓNOMICO

Tabla XVII. Costos de inversión de capital para el sistema de PE's

Artículo de Costo	Costo, \$
Costos directos	
Costos de equipo adquirido	293,658.75
Equipo auxiliar	87,716.25
Factor a utilizar = A	381,375.00
Instrumentación	38,137.50
Impuestos de venta	11,441.25
Transporte	19,068.75
Costo de equipo comprado = B	450,022.50
Costos directos de instalación	
Cimientos y soportes	18,000.90
Manejo y erección	225,011.25
Sistema eléctrico	36,001.80
Plomería	4,500.23
Aislamiento de ductos	9,000.45
Pintura	9,000.45
Costos directos de instalación	301,515.08
Total de costos directos	751,537.58
Costos indirectos(instalación)	
Ingeniería	90,004.50
Gastos de construcción y terreno	90,004.50
Honorarios de contratistas	45,002.25
Inicio de la obra	4,500.23
Pruebas de desempeño	4,500.23
Estudio de modelo	9,000.45
Contingencias	13,500.68
Total de costos indirectos	256,512.83
Inversión total de capital	1,008,050.40

Tabla XVIII. Costos anuales para el sistema de PE's

Articulo de Costo	Costo, \$
Costos directos	
Mano de obra	
Operador	43,200.00
Supervisor	6,480.00
Materiales de Mantenimiento	4,500.23
Electricidad	665,807.05
Costo directo total	719,987.28
Costos indirectos	
Gastos de mantenimiento	32,508.00
Recuperación de capital	36,527.43
Impuestos	2,565.13
Aseguranza	2,565.13
Costos administrativos	5,130.26
Total de costos indirectos	79,295.94
Costo anual total	799,283.22

4.1 Beneficios obtenidos por operación de los PE's utilizando las unidades generadoras Orimulsión

Tabla XIX. Ceniza recolectada con la Orimulsión

Fecha	Peso Neto (Kg)
25-04-05	44,140
04-07-05	60,160
05-09-05	41,490
28-10-05	38,650
13-12-05	22,540
03-01-05	23,300
22-02-06	32,800
29-03-06	32,870
TOTAL	295,950

El precio de venta esta fijado en US\$ 2100.09 la tonelada métrica, por lo cual el total expuesto de ceniza en la Tabla XIX equivale a 295.95 toneladas métricas y a una venta neta de US\$ 651,521.635.

4.2 Beneficios obtenidos por operación de los PE's utilizando las unidades generadoras Bunker

Tabla XX. Ceniza recolectada con el bunker

Fecha	Peso Neto (Kg)
17-05-06	21,060
04-12-06	38,550
TOTAL	59,610

El precio de venta esta fijado en US\$ 2100.09 la tonelada métrica, por lo cual el total expuesto de ceniza en la Tabla XX equivale a 59.61 toneladas métricas y a una venta neta de US\$ 125,186.365.

4.3 Relación beneficio costo de los PE's utilizando las unidades generadoras Bunker

- Inversión de capital total + Costo anual total = 1,807,333.62
- Recuperación de capital = 36,547.23
- Beneficio obtenido utilizando las unidades generadoras Bunker = 125,186.35
- Recuperación de capital + Beneficio = 161,733.58

$$\text{Relacion beneficio costo} \approx \frac{\text{Beneficios totales}}{\text{Costos totales}} \quad (4.1)$$

$$\text{Relacion beneficio costo} \approx \frac{161,733.58}{1,807,333.52} \approx 0.0895$$

4.4 Relación beneficio costo de los PE's utilizando las unidades generadoras Orimulsión

- Inversión de capital total + Costo anual total = 1,807,333.62
- Recuperación de capital = 36,547.23
- Beneficio obtenido utilizando las unidades generadoras Orimulsión = 651,521.635
- Recuperación de capital + Beneficio = 688068.865

$$\text{Relacion beneficio costo} \approx \frac{\text{Beneficios totales}}{\text{Costos totales}}$$

$$\text{Relacion beneficio costo} \approx \frac{688068.865}{1,807,333.52} \approx 0.380$$

Tiempo de recuperación de capital

Para determinar el tiempo de recuperación de capital se tomaran los costos y beneficios obtenidos durante un año de las unidades generadoras utilizando combustible Orimulsión, los cuales se muestran a continuación:

- Inversión de capital total + Costo anual total = 1,807,333.62
- Recuperación de capital + Beneficio = 688068.865

También se utilizara una TIR de 7% de interés anual aplicada a la siguiente fórmula:

$$VAN \approx -C + \frac{B}{(1+TIR)^n} \quad (4.2)$$

La TIR es la tasa de interés para la cual los beneficios totales actualizados (B) es igual a los costos totales actualizados (C), por lo cual el VAN = 0 de lo cual se obtiene:

$$0 \approx -1807333.62 + \frac{688068.86}{(1 + 0.07)^n}$$

Despejando para n :

$$n \approx \ln \frac{\left(\frac{688068.86}{1807333.62} \right)}{1.07}$$

$$n \approx 20 \text{ años}$$

4.6 Aprovechamiento de la utilización de PE's en plantas generadoras con base de combustibles fósiles

El resultado de la relaciones beneficio costo nos indican que a pesar de que se han reducido costos en la inversión inicial, anualmente para la operación y mantenimiento de los PE's utilizados en planta de generación Arizona gracias a la recolección y venta de cenizas, los resultados demuestran que estos sistemas requieren inversiones de capital relativamente altas así mismo costos de operación y mantenimiento elevados.

Este sistema de PE's instalado en planta Arizona está diseñado especialmente para funcionar con plantas generadoras que utilizan combustible Orimulsión ya que por sus altos contenidos de emisiones de material particulado y óxidos de azufre es obligatorio por las normativas del banco mundial mantenerlos dentro de los límites

establecidos y esto se logra gracias al sistema de PE's instalado según como se ha demostrado en el estudio ambiental de este trabajo.

Se resalta el hecho de que los sistemas de PE's no han sido diseñados para obtener beneficios económicos de los derivados del proceso de la combustión interna de las unidades generadoras, sino el de mantener dentro de los límites establecidos por el banco mundial las emisiones contaminantes que causan severos daños a seres humanos y recursos naturales, con la finalidad de preservar el ecosistema en el cual habitamos.

El aprovechamiento de utilizar PE's consiste en que se logra la generación de energía eléctrica utilizando combustible Orimulsión, manteniendo los parámetros establecidos por las normativas ambientales por debajo de los límites establecidos así mismo gracias a la recolección y venta de cenizas se han logrado reducir costos anuales para la operación y mantenimiento de los PE's.

CONCLUSIONES

1. Los precipitadores electrostáticos son dispositivos eléctricos para control de emisiones. Estos son diseñados especialmente para atrapar y remover material particulado de los gases de escape de las unidades generadoras utilizando para ello fuerzas electrostáticas, la eficiencia de recolección de estos dispositivos dependen de su tamaño y calidad, pero se han registrado niveles de reducción de material particulado superiores el 99%.
2. Se han fundamentado los razonamientos eléctricos del principio de operación básico de los precipitadores electrostáticos en cuatro secciones; 1. punto de operación eléctrico, 2. proceso de cargado de partículas, 3. recolección de partículas, 4. escabullimiento y re-encauzamiento por golpeteo, en las cuales se han desarrollado matemática y electrostáticamente las ecuaciones que definen el comportamiento electromagnético interno de los precipitadores electrostáticos.
3. Los resultados del estudio ambiental sin utilizar precipitadores electrostáticos han determinado que anteriormente, el aire ambiental externo en planta termoeléctrica Arizona se encontraba alrededor de los 139.2 mg/Nm^3 para el combustible Orimulsión y para el combustible Bunker se encontraba alrededor de los 74.05 mg/Nm^3 de contenido de material particulado, los cuales se encontraban arriba del contenido máximo establecido por el Banco Mundial 50 mg/Nm^3 . Los resultados del estudio ambiental utilizando precipitadores electrostáticos han demostrado que actualmente se han reducido considerablemente las emisiones de material particulado para el combustible Orimulsión a 17.59 mg/Nm^3 y para el combustible Bunker 10.99 mg/Nm^3 , logrando así mantener por debajo de los límites normados las emisiones de material particulado.

4. Dentro del estudio técnico se ha elaborado un manual, en el cual se especifica el contenido y el monitoreo del sistema del precipitador electrostático, este manual también cuenta con una cantidad significativa de descripciones del funcionamiento de la diversidad de equipos y dispositivos que contiene el sistema del precipitador electrostático, también cuenta con las instrucciones para operación adecuada de estos dispositivos para optimizar control y mantenimiento de los mismos.

5. Se ha elaborado una guía de mantenimiento predictivo, en la cual se resaltan las inspecciones que deben de realizarse en el sistema de precipitadores electrostáticos para determinar las condiciones de equipos y dispositivos, a su vez pronosticar posibles anomalías y reparaciones a realizar para mitigar que den a lugar fallas posteriores.

6. Se ha elaborado un estudio económico dentro del cual se han estimado los costos de operación y de mantenimiento, los beneficios obtenidos de la venta de ceniza recolectada por el sistema de precipitadores electrostáticos, de las relaciones beneficio costo se obtuvieron los siguientes resultados;
 - Para los precipitadores electrostáticos utilizando las unidades generadoras Bunker la relación beneficio costo fue de 0.0895,
 - Para los precipitadores electrostáticos utilizando las unidades generadoras Orimulsión la relación beneficio costo fue de 0.3810,
 - De dichos resultados se determino que no hay buena rentabilidad del sistema de precipitadores electrostáticos y además se ha calculado con una TIR del 7% que el tiempo de recuperación del capital invertido será a los veinte años de estar funcionando el sistema de precipitadores electrostáticos.

RECOMENDACIONES

1. La construcción física de los precipitadores electrostáticos presentada en este trabajo puede variar a la de otros tipos de precipitadores electrostáticos, ya que de acuerdo a las necesidades que se tengan dentro del proceso en el cual van a ser aplicados, se tendrá que utilizar equipos y/o accesorios adicionales.

2. En el estudio económico se ha determinado que la inversión se recuperará a los veinte años de estar en funcionamiento el sistema de precipitadores electrostáticos, pero este tiempo puede llegar a prolongarse debido a las paradas que se presenten en el sistema de precipitadores electrostáticos por diversos factores ajenos al sistema.

3. La frecuencia de la inspecciones y mantenimientos de los sistemas eléctricos de alta y baja tensión descritos en este trabajo pueden variar dependiendo de las siguientes condiciones:
 - ciclos operativos de equipos y dispositivos
 - corrientes de carga
 - confiabilidad de la operación
 - condiciones ambientales

BIBLIOGRAFÍA

1. Mr. Kenneth Woodard. **Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias. E.E.U.U. 1998.**
2. Cooper, C.D and F.C. Alley. **Air Pollution Control: A Design Approach.** 2ª ed. Waveland Press, Prospect Heights, Illinois. 1994.
3. **OAQPS Control Cost Manual (4ª Ed., EPA 450/3-90-006)** U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. Enero 1990.
4. U.S. Environmental Protection Agency. **Operation and Maintenance Manual for Electrostatic Precipitators, EPA-625/1-85-017,** Research Triangle Park, NC, Septiembre 1985.
5. White, H. J. **“Control of Particulates by Electrostatic Precipitation,”** Chapter 12 in Handbook of Air Pollution Technology, ed. By S. Calvert and H. M. Englund, New York, NY: Wiley, 1984.
6. WORLD BANK GROUP. **Thermal Power: Guidelines for New Plants.** Pollution Prevention and Abatement Handbook, Julio 1998.

Referencias electrónicas

7. **Ingeniería Civil y Medio Ambiente**
www.miliarium.com 2001, 2004

8. **Hojas de datos EPA. Técnicas de control de contaminantes del aire**
www.estrucplan.com.ar 2002

9. **Air emissions legislation review for internal combustion engines**
www.wartsila.com Noviembre, 2007

APÉNDICES

Estimación de la inversión de capital total para sistemas de PE's

La inversión de capital total para un sistema de PE's incluye los costos de la estructura del PE's, partes internas, golpeadores, fuente de poder, equipo auxiliar y los costos directos e indirectos usuales asociados a la instalación o colocación de equipo nuevo de control.

Los costos de instalar y operar un PE's incluyen tanto a los costos de capital como a los anuales. Los costos de capital son todos los costos iniciales del PE's relacionados con el equipo. Los costos anuales son los costos directos de la operación y mantenimiento del PES durante un año, más costos indirectos tales como el gasto de mantenimiento; la recuperación del capital; e impuestos, aseguranza y cargos administrativos.

Costo total de equipo comprado

El costo total de equipo comprado de un sistema de PE's, es la suma de los costos del PE's, opciones, equipo auxiliar, instrumentos y controles, impuestos y fletes. Estos últimos tres artículos generalmente se toman como porcentajes de un costo total estimado de los primeros tres artículos. Los costos de equipo estándar y de otras opciones pueden variar desde 0 hasta más de 150 por ciento del costo del puro PE's, dependiendo del sitio y de los requerimientos de aplicación.

Estimación de los costos totales anuales

Costos directos anuales

Los costos directos anuales incluyen la mano de obra de operación y de supervisión, los materiales de operación, reemplazo de los golpeadores y de los electrodos, mantenimiento (mano de obra y materiales), servicios, disposición del polvo.

La mayoría de estos costos se discuten individualmente más adelante. Estos varían considerablemente con la localización y el tiempo y, por esta razón, deben obtenerse a conveniencia del sistema de PES específico que esté siendo costeadado.

Mano de obra de operación y de supervisión

Es necesaria una operación apropiada del PES para cumplir con las regulaciones aplicables a la emisión de particulados y asegurar costos mínimos. Un PE's es una pieza de equipo cara.

Aún el equipo bien diseñado se deteriorará rápidamente si es mantenida impropiamente y tendrá que ser reemplazada mucho antes de lo que debiera ser necesario. No solo puede la operación y el mantenimiento apropiados ahorrar dinero del operario, tal programa de operación y mantenimiento puede también contribuir a las buenas relaciones con la agencia que gobierna el control de la contaminación, mostrando buena fe con esfuerzos para cumplir con las regulaciones en materia de aire ambiental.

A continuación se presentan las tablas generalizadas que se utilizan para determinar costos de inversión de capital para sistemas de PE's, parámetros y factores a considerar para determinar los costos de operación y de supervisión anuales.

Tabla A1. Costos de inversión de capital para sistemas de PE's

Artículo de Costo	Costo, \$
Costos directos	
Costos de compra de equipo	Tal como se estime (A)
Equipo Auxiliar	Tal como se estime (A)
Factor a utilizar = A	A
Instrumentación	0.10 A
Impuestos de venta	0.03 A
Transporte	0.05 A
Costo de equipo comprado = B	B = 1.18 A
Costos directos de instalación	
Cimientos y soportes	0.04 B
Manejo y erección	0.50 B
Eléctrico	0.08 B
Plomería	0.01 B
Aislamiento de ductos	0.02 B
Pintura	0.02 B
Costos directos de instalación	0.67 B
Total de costos directos	1.67 B
Costos indirectos(instalación)	
Ingeniería	0.20 B
Gastos de construcción y terreno	0.20 B
Tarifas de contratistas	0.10 B
Iniciales	0.01 B
Pruebas de desempeño	0.01 B
Estudio de modelo	0.02 B
Contingencias	0.03 B
Total de costos indirectos	0.57 B
Inversión total de capital	2.24 B

Tabla A2. Parámetros de costos anuales para el calculo de sistemas de PE's

Parámetros	Descripción	Valores típicos
Parámetros de Costos Directos		
Factor de Operación (FO)	Horas de operación de absorbedores por año	8,640 horas/año
Salario de Mano de Obra del Operador (SO)	Salario de la mano de obra del operador	\$25.00/hora
Factor de Turno del Operador (TO)	Fracción del turno en el absorbedor	0.25
Factor de Mano de Obra del Supervisor (MS)	Fracción del costo de la mano de obra del supervisor	0.15
Factor de Mano de Obra del Operador (MO)	Fracción del costo de la mano de obra del operador	0.33
Factor de labor de mantenimiento (ML)	Dependiente de la superficie de la placa recolectora	Específico del Sitio
Factor de materiales de mantenimiento (MF)	Fracción del Costo del Equipo Adquirido	0.01
Electricidad (E)	Costo de la electricidad	\$0.07/kW-hora
Químicos (C)	Costo de los agentes químicos acondicionadores	Específico del Sitio
Aire comprimido (CA)	Costo del aire comprimido para los golpeadores	\$0.18/1000 pies cúbicos
Tratamiento de aguas residuales (W)	Costo del tratamiento del efluente de PE's húmedo	\$1.55-\$2.55/1000 galones
Desecho de residuos (D)	Costo del desecho de polvo	\$20-30/tonelada
Parámetros de Costo Indirectos		
Factor de trabajos generales (overhead - OV)	Fracción de la Mano de Obra Total y Costos (MM)	0.6
Tasa de Interés Anual (I)	Costo de Oportunidad del Capital	7%
Vida de Operación (n)	Expectativa de Vida de Operación del Absorbedor	20 años
Factor de Recuperación del Capital (CRF)	Función de (n) e (I)	0.0944
Impuestos (IMP)	Fracción del TCI	0.01
Aseguranza (SEG)	Fracción del TCI	0.01
Costos Administrativos (CA)	Fracción del TCI	0.02

Tabla A3. Factores de costos anuales para el calculo de sistemas de PE's

Articulo de costo	Formula	Factor
Costos Directos		
Mano de Obra		
Operador (MOO)	FO*SO*TO	A
Supervisor (MOS)	SF*MOO	0.15A
Coordinador (MOC)	CF*MOO	0.33A
Mantenimiento (MOM)	Especifico del Sitio	MOM
Materiales de mantenimiento (MM)	FM*PEC	0.01PEC
Electricidad (E)	Potencia*TE	E
Sustancias Químicas (Q)	Especifico del Sitio	C
Aire Comprimido (AC)	AC	AC
Tratamiento de Aguas Residuales (TAR)	TAR	TAR
Desecho de Residuos (D)	D	D
Costo Directo Total	CD	A + MOM + 0.01 PEC + E + Q + AC + TAR + D
Costos indirectos		
Gastos de mantenimiento	GM*(MOO+MOS+MOC+ MOM+MM)	0.89 A + 0.6 MOM + 0.006PEC
Recuperación de Capital	CRF*TCI	0.1424 TCI
Impuestos	IMP*TCI	0.01 TCI
Aseguranza	SEG*TCI	0.01 TCI
Costos Administrativos	AC*TCI	0.02 TCI
Costo indirecto total	CI	0.89 A + 0.6 MOM + 0.006 PEC + 0.1824 TCI
Costo Anual Total	CD+CI	2.37 A + 1.6 MOM + 0.016 PEC+ 0.1824 TCI + E + Q + AC + TA + D