

CAPÍTULO 1

Tecnología	1-1
Desarrollo de la Tecnología	1-2
Precipitadores en comparación con otros aparatos de control de contaminación	1-3
Ciclones	1-3
Colectores de Proceso Húmedo	1-3
Colectores de Cartucho	1-4
Colectores de Bolsas	1-4
Ventajas de los precipitadores	1-5

CAPÍTULO 2

Equipo y Componentes del Precipitador	2-1
Tipos de Precipitadores	2-2
Componentes del precipitador	2-4
Estructura	2-4
Penthouse/Compartimientos de Aisladores	2-6
Tolvas	2-6
Aparatos de Descarga	2-8
Zona de Tratamiento	2-9
Placas Perforadas	2-10
Electrodos de Descarga	2-10
Electrodos de Recolección	2-12
Otros Componentes Importantes	2-14
Aisladores	2-14
Sistemas de Purga de Aire	2-15
Sacudidores y Vibradores	2-15
Martillo/Yunque	2-16
Impulso Magnético	2-17
Vibradores	2-18
Limpieza Acústica	2-18
Precipitadores de Marco Rígido	2-19

CAPÍTULO 3

Componentes y Sistema Eléctrico del Precipitador..... 3-1

Componentes de la Fuente de Poder	3-2
Interruptor Principal	3-4
Contacto Magnético	3-4
Rectificadores Controlados de Silicón	3-4
Reactor Limitador de Corriente	3-6
Transformador/Rectificador	3-7
Controles Automáticos de Voltaje	3-8
Medidores	3-9
Reactores de Núcleo Saturable	3-10
Eficiencia Eléctrica y Transferencia de Potencia	3-11
Midiendo la Eficiencia Eléctrica	3-12
Factor de Forma Primario	3-13
Conducción Fraccional Secundaria	3-15
Importancia de la Forma de Onda del Precipitador	3-16
Eficiencia de Recolección	3-16
Reactores de Núcleo Saturables y Formas de Onda	3-19
Eficiencia Eléctrica	3-19

CAPÍTULO 4

Teoría y Operación de los Precipitadores 4-1

Sección 1- Proceso de Precipitación	4-2
Seccionalización Eléctrica	4-2
Seccionalización Paralela	4-4
Cargando Partículas en el Precipitador	4-6
Generación de Corona	4-7
Carga de Campo y Difusión	4-9
Descarga de Partículas en el Electrodo de Recolección	4-10
Sacudiendo las Partículas a la Tolva	4-10
Sección 2 - Factores que Influyen la Operación del Precipitador	4-11
Determinando la Eficiencia del Precipitador	4-11
Ecuación de Deutsch-Anderson Modificada	4-12

Entendiendo las Ecuaciones de Deutsch-Anderson	4-13
Area de Recolección Específica	4-13
Velocidad de Migración	4-15
Operación del Precipitador Sin Carga de Polvo	4-16
Espacio de Carga - Altas Concentraciones de Polvo	4-18
Resistividad y Corona Inversa	4-21
Corona Invertida	4-22
Baja Resistividad	4-23
Efecto de la Resistividad	4-24
Curvas de Voltaje-Corriente	4-26
Razón de Orientación	4-27
Distribución del Flujo de Gas	4-28

CAPÍTULO 5

***Mantenimiento y Soluciones* 5-1**

Problemas Típicos del Precipitador	5-2
Cables Rotos	5-2
Distribución del Gas	5-3
Problemas Mecánicos Internos/ Alineación de los Cables-Placas	5-4
Corrosión	5-5
Aisladores Rotos	5-5
Problemas de la Fuente Eléctrica	5-6
Problemas del Sistema de Sacudido	5-7
Resistividad y Tamaño	5-7
Mantenimiento de Rutina	5-8

CAPÍTULO 6

***Guía de Instalación, Arranque y Paros* 6-1**

Lista de Verificación	6-4
Mediciones de Voltaje-Corriente con el Precipitador en Línea	6-6
Arranque	6-6
Procedimiento de Arranque Típico	6-7
Paros	6-8

Capacitación del Operador	6-9
Seguridad	6-9
Cableado y Controles	6-10
Acceso	6-10
Fuego/Explosión	6-11

APÉNDICE



CAPÍTULO 1

Tecnología

DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA

El control de la emisión de partículas en los procesos industriales ha sido un problema al que se ha dado más importancia en la última parte del siglo XX. Frederick Cottrell desarrolló la tecnología electrostática que ha estado en uso desde principios de 1900. La primera instalación exitosa recolectaba vapor de ácido sulfúrico. Posteriormente, cuando los boilers de carbón pulverizado se volvieron más populares, el diseño de los precipitadores continuó mejorando y se volvió más importante en la recolección de ceniza debido a su alta eficiencia de recolección. El diseño que conocemos hoy en día se estableció al finalizar los años veinte.

Durante los años sesenta, el énfasis en cuanto al ambiente aceleró la tendencia de mejorar los aparatos de control de partículas. Aunque el diseño básico del precipitador había permanecido virtualmente sin cambios, se continuó mejorando la fuente de poder y selección de materiales, permitiendo que los precipitadores aumentaran en su eficiencia de recolección.

Con el surgimiento del Acto de Aire Limpio y sus limitaciones tan estrictas, las eficiencias de recolección han aumentado a un rango de 99.5 a 99.9%. Al mismo tiempo, otras regulaciones ambientales han reducido el nivel de emisiones de SO₂, haciendo necesario el cambio de combustibles de alto a bajo sulfuro, o la instalación de equipo para eliminar el SO₂. Para cumplir con estas regulaciones, se ha cambiado el diseño y tamaño de los precipitadores y la necesidad de una operación más eficaz con poco mantenimiento se ha vuelto imperativa.

Hoy día, el refinamiento en operación, materiales y nuevas invenciones abundan para los precipitadores electrostáticos, incluyendo el electrodo de descarga de tubería con picos, mayor espaciado entre placas, energización intermitente, controles de voltaje de microprocesador y controles de sacudido, reactores limitadores de corriente de inductancia variable, y programas de computadora que permiten a los operadores ver las operaciones del precipitador desde localidades remotas, guardar datos y ver otros parámetros de operación como curvas de voltaje-corriente.

Precipitadores en comparación con otros aparatos de control de contaminación

Aunque los precipitadores son extremadamente eficientes y ampliamente usados, hay otros aparatos importantes en el control de emisiones de partículas. Los siguientes factores ayudan a comparar estos aparatos entre sí:

- concentración o carga de salida
- humedad de entrada
- temperatura de entrada
- tipo de partículas (polvo) recolectado
- concentración del polvo de entrada
- volumen de entrada

(Nota: Estos mismos factores ayudan a determinar el diseño y tamaño del precipitador y se analizan en el Capítulo 4.)

Ciclones

Los ciclones (Figura 1.1) son aparatos centrífugos donde el aire entra tangencialmente, forzando el material hacia la parte externa del cono y descargándose por la tolva. El aire limpio sale por la parte superior del ciclón. Muchas veces, los ciclones se instalan en aplicaciones de boilers para reducir la carga del precipitador.

Colectores de Proceso

Húmedo

Estos tipos de colectores usan agua para saturar el flujo de gas y separar las partículas del gas al humedecerlas. Se usan dos tipos de colectores de proceso húmedo; los scrubbers (Figuras 1.2 y 1.3), que saturan el polvo y lo llevan a un pozo de asentamiento, y precipitadores húmedos que cargan las partículas de

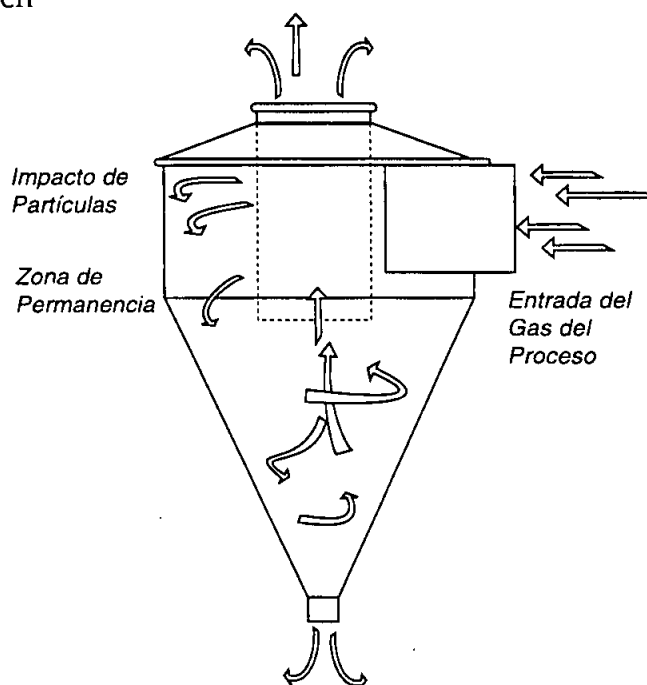


Figura 1.1 - Colector Ciclón Típico

vapor y las recolectan en tuberías. El líquido recolectado se acumula en la parte inferior del precipitador para ser descargado posteriormente. Los colectores de proceso húmedo crean lodo que es un problema de contaminación

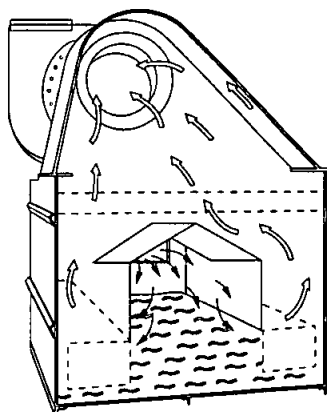


Figura 1.2
Scrubber de Baja Energía

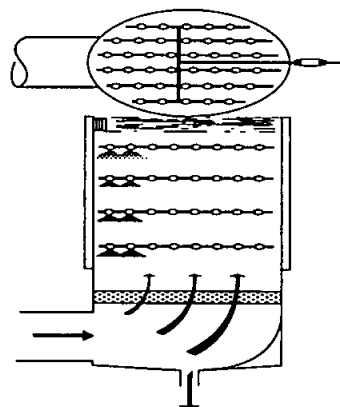


Figura 1.3
Scrubber de Torre de Rocío

secundaria que también

debe solucionarse. Los colectores de proceso húmedo se usan típicamente en calderas con combustible de madera, carbón y aplicaciones de vapor de ácido sulfúrico.

Colectores de Cartucho

Los colectores de cartucho (Figura 1.4) usan filtros plegados de 2 o 3 pies de largo y pueden ser de papel o fieltro. Los colectores de cartucho típicamente se usan en procesos industriales pequeños con flujos menores a 25,000 pies³/min.

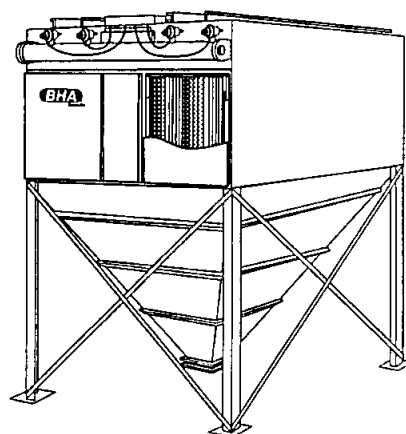


Figura 1.4 - Colector de Cartuchos

Colectores de Bolsas

Los colectores de bolsas (también llamados colectores de polvo) son casi tan eficientes como los precipitadores y, al igual que los precipitadores, se encuentran en todo el mundo en una amplia variedad de aplicaciones. Los colectores de bolsas (Figura 1.5) son estructuras que contienen desde varias docenas a varios miles de bolsas de tela. El número de bolsas que tiene una unidad, así como el material de que está hecha la bolsa depende de la aplicación. El aire sucio se empuja o jala a través de las bolsas de filtrado creando una capa de polvo en la superficie de la bolsa, que separa el polvo del aire limpio. Las bolsas se limpian usando sacudido mecánico, aire reverso, o pulsándolas con aire comprimido.

Ventajas de los precipitadores

Los precipitadores tienen varias ventajas sobre otros aparatos, ya que son extremadamente eficientes, especialmente comparados con los ciclones y colectores de proceso húmedo.

Como ya se mencionó, los colectores de bolsas son bastante eficientes.

Aunque recolectan el polvo de manera muy diferente a los precipitadores, la diferencia más importante es que los precipitadores tienen una caída constante de

presión y un funcionamiento variable, mientras que los colectores de bolsas mantienen un funcionamiento constante y una caída de presión variable.

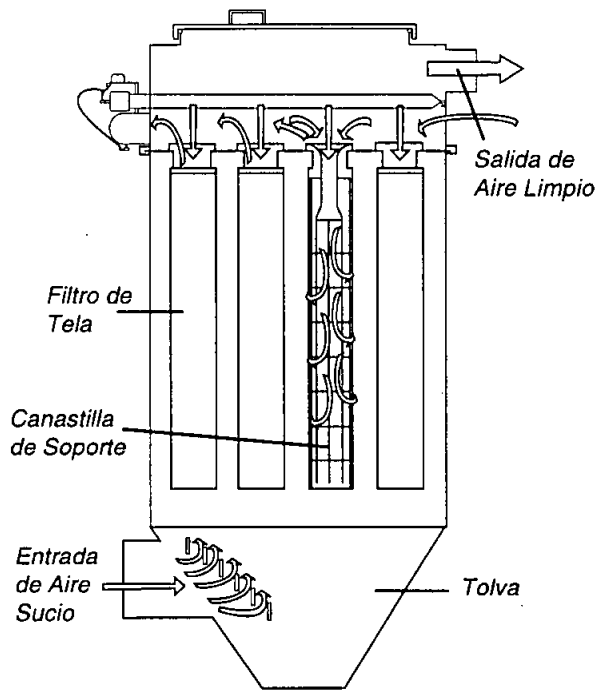


Figura 1.5 - Colector de Bolsas (Pulse-jet)

Otras ventajas de los precipitadores incluyen:

1. Versatilidad - Funcionamiento eficaz en casi todos los procesos industriales.
2. Eficiencia - Mantiene una alta eficiencia de recolección (generalmente mayor al 99.9%) en partículas de todos tamaños, incluyendo sub-micrones.
3. Consumo de energía - 20 a 60 kW por 100,000 pies³ de gas, dependiendo del tipo de unidad, proceso, eficiencia, etc.
4. Pérdida de presión - Resistencia despreciable, rara vez es más de 0.4" de columna de agua. La potencia del ventilador es por consiguiente baja.
5. Adaptabilidad - Tolera considerables fluctuaciones en las condiciones de operación, tales como temperaturas extremas.



6. Efecto - Normalmente el polvo se recolecta en su estado original.

7. Mantenimiento - Partes internas: mantenimiento normal durante paradas programadas. Partes externas: regular pero no frecuente.

8. Durabilidad - Su construcción asegura una larga vida bajo condiciones arduas; efectos de abrasión insignificantes debido a las bajas velocidades de operación.

El lector que tenga alguna experiencia con precipitadores puede preguntarse que si los precipitadores son tan buenos, ¿por qué parece que tienen tantos problemas?

Aún cuando los precipitadores son relativamente fáciles de entender, generalmente muestran características de operación poco usuales o no operan a la eficiencia de su diseño original.

El resto de este libro se dedica a ayudarle a entender mejor este aspecto de los precipitadores.



CAPÍTULO 2

Equipo y Componentes del Precipitador

EQUIPO Y COMPONENTES DEL PRECIPITADOR

Para entender la operación del precipitador, es importante comprender el diseño y función de sus componentes internos y externos, mecánicos y eléctricos, y cómo estos componentes trabajan en unión bajo condiciones dinámicas. Este capítulo presenta el equipo mecánico básico del precipitador así como la variedad de diseños existentes en el campo. El sistema eléctrico del precipitador y sus componentes se estudia en detalle en el Capítulo 3.

Primero, debemos preguntarnos ¿qué es un precipitador electrostático? El proceso de precipitación electrostática consiste de tres pasos fundamentales:

1. Carga de partículas
2. Recolección de partículas
3. Desalojo del material recolectado

Los primeros dos pasos son funciones de las condiciones eléctricas dentro del precipitador mientras que el tercero depende más de las fuerzas mecánicas.

Tipos de Precipitadores

Los precipitadores se usan en una variedad de industrias para recolectar varios tipos de partículas. En la industria de pulpa y papel, los precipitadores se usan para recuperar las sustancias químicas usadas durante el proceso. En las plantas de producción, los precipitadores recolectan clinker y polvo de cemento, vapores ácidos y de petróleo e insecticidas. También se usan en la industria del acero, petróleo y, por supuesto, la industria eléctrica. Básicamente, hay dos tipos de precipitadores: húmedos y secos. Este programa sólo estudia material pertinente a los precipitadores de tipo seco.

Hay varios tipos básicos de precipitadores secos. Como se muestra en la Tabla 1.1, difieren en sus componentes internos, estilo de limpieza (mecanismo de sacudido) y características de diseño.

Tabla 1.1 – Estilos de Precipitadores Secos

	Cable con peso (Americano)	Marco rígido (Europeo)	Electrodo rígido (Americano)
Espaciamiento:	9 - 10 pulg. (típico)	10 - 12 pulg.	11 - 16 pulg.
Altura de placa:	20 - 36 pies	20 - 50 pies	20 - 50 pies
Diámetro del cable:	.105 - .125 pulg.	Varios diseños de electrodos de descarga	Varios diseños de electrodos de descarga
Sacudido:	Impacto superior o lateral	Martillo	Sacudido superior

La Figura 2.1 ilustra el principio básico. Simplemente, es un aparato que limpia gases del proceso usando fuerzas eléctricas para quitar partículas sólidas que acarrea el flujo de gas. Los gases sucios se pasan a través de un campo eléctrico entre electrodos de polaridades opuestas. Los electrodos de descarga - llamados así por la corona de descarga que resulta de la aplicación de alto voltaje - imparten una carga negativa a las partículas. Estas partículas son atraídas a los electrodos de recolección que son positivos respecto a los electrodos de descarga y en la práctica están conectados a tierra.

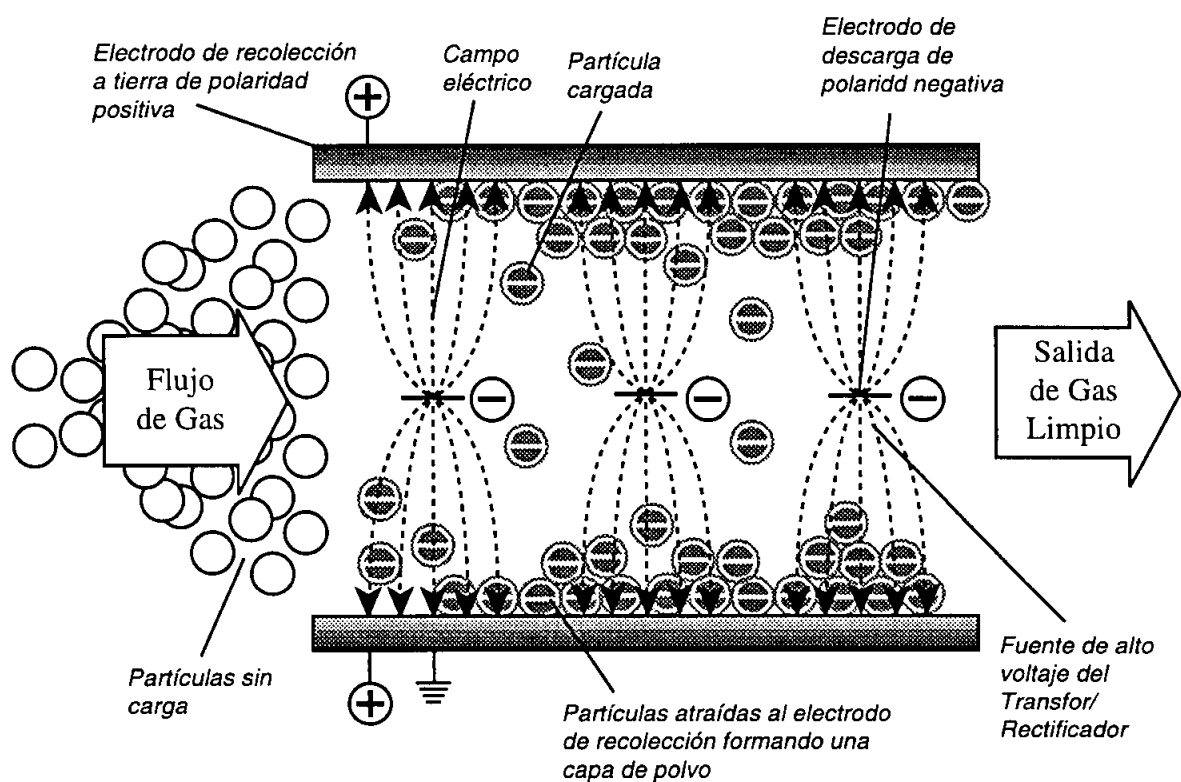


Figura 2.1 - Principio de operación básica de un precipitador electrostático

En el caso de polvo, las partículas se acumulan en el electrodo de recolección hasta que una fuerza de sacudido se aplique a los electrodos para soltar y desalojar esta capa en aglomerados lo suficientemente grandes que por su peso caen en la tolva sin reintroducirse.

El proceso de precipitación y sus operaciones se comentan en detalle en el Capítulo 4. Debe notarse que los precipitadores no pueden separar gases como tales, sólo las partículas contenidas en los gases.

Componentes del precipitador

Todos los precipitadores electrostáticos, sin importar su diseño particular, contienen los siguientes diseños esenciales:

- Estructura

Estructura de metal externa/soportes, penthouse o compartimientos de aisladores, columnas y barras de soporte, tolvas

- Zona de tratamiento

Placas perforadas, cables/electrodos de descarga, placas de recolección/electrodos

- Componentes estructurales

Marcos inferiores y superiores de los electrodos de descarga, sistema de soporte de las placas

- Sistema de fuente eléctrica de alto voltaje

Circuito de rompimiento, contacto magnético, medidores, controles de alto voltaje, rectificadores controlados de silicón, reactores limitadores de corriente, transformadores/rectificadores

- Otros componentes importantes

Sacudidores y/o vibradores, controles de sacudido, sistemas de purga de aire, aisladores

La Figura 2.2 muestra un precipitador de diseño típico Americano. A lo largo de esta sección en componentes mecánicos nos referimos a éste, y los otros precipitadores mostrados en este capítulo.

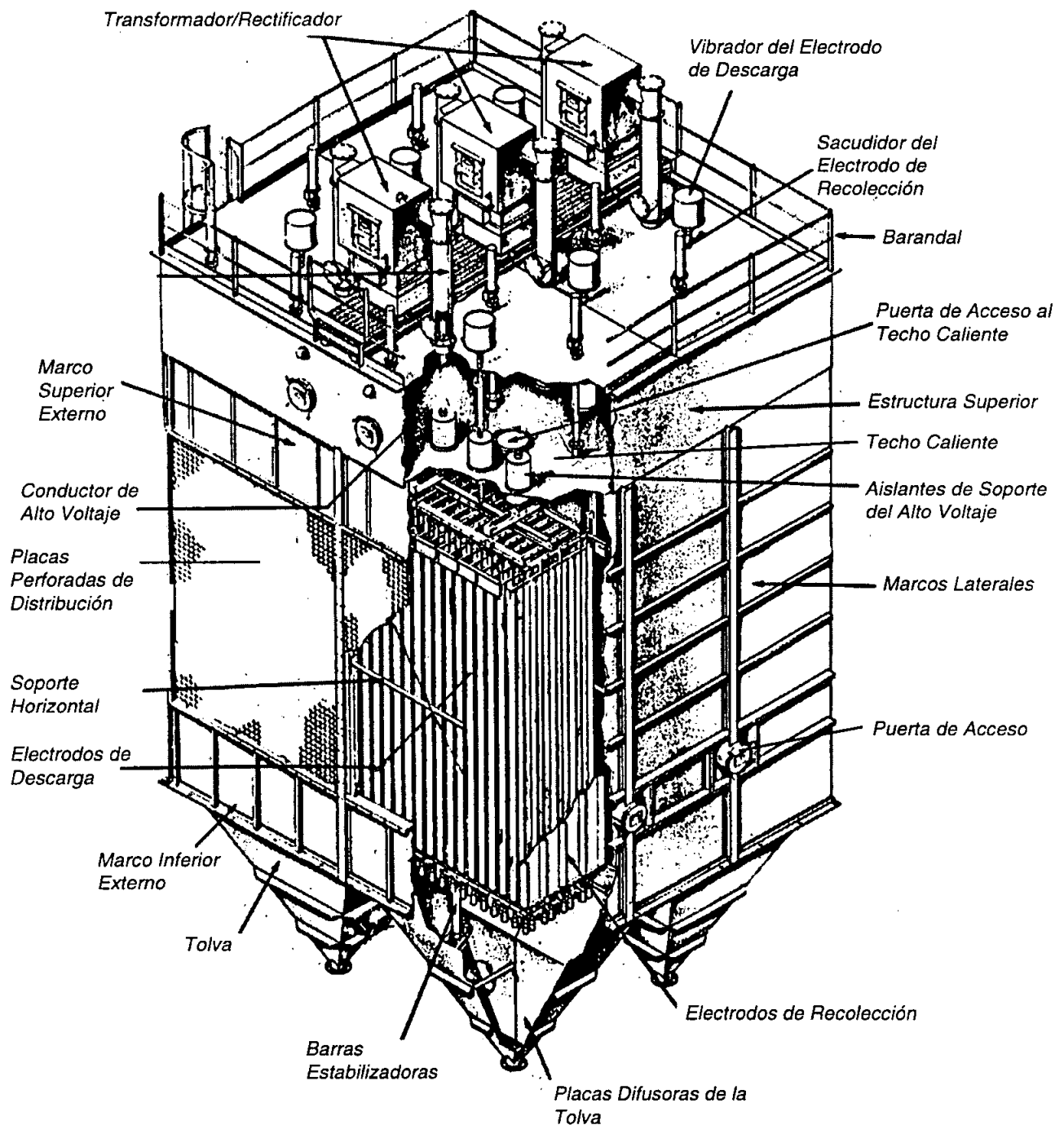


Figura 2.2 - Precipitador Americano Típico (con estructura superior)

Estructura

La estructura del precipitador incluye todas las placas de acero y barras de soporte usadas para cubrir y soportar a los electrodos y otros componentes del precipitador en un marco rígido para mantener el alineamiento y configuración adecuados de los electrodos. La estructura de soporte es especialmente crítica porque los componentes del precipitador se pueden expandir o contraer debido a las diferencias de temperatura. Tensiones excesivas de temperatura pueden romper las uniones de la estructura y tolvas, así como otras soldaduras. La estructura externa generalmente está hecha de bajo carbón o acero al carbón 0.5 a 0.6cm (3/16 a 1/4 pulg.) de grueso.

La estructura y tolvas deben estar cubiertas con material aislante para conservar el calor y prevenir la corrosión debido a la condensación del vapor de agua y ácidos en los componentes internos. Si el precipitador se instala en una caldera de combustible de carbón, la temperatura del gas se debe mantener por encima de 120°C (250°F) en todo momento para prevenir que el vapor de ácidos se condense. Este aislamiento también ayuda a minimizar cambios en la temperatura, especialmente en precipitadores de lado-caliente. Las tolvas deben tener aislante y calentadores debido a que la ceniza fría tiende a apelmazarse y es extremadamente difícil de sacar. El material aislante generalmente es 10 a 15 cm (4 a 5 pulg.) de ancho.

Penthouse/Compartimientos de Aisladores

La Figura 2.2 (página anterior) y la Figura 2.3 ilustran la diferencia entre un precipitador con compartimientos de aisladores y uno con Penthouse. Esencialmente no hay diferencias de operación entre los dos.

Los diseños con penthouse incluyen un área bajo techo que contiene los conductores de alto voltaje y los aisladores de soporte. Los diseños con compartimientos de aisladores no tienen esta área, sino que tienen cubiertas individuales para proteger los conductores de alto voltaje y los aisladores de soporte.

Algunos precipitadores tienen protección ambiental sobre el techo del precipitador y no se debe confundir ésta con el diseño de penthouse.

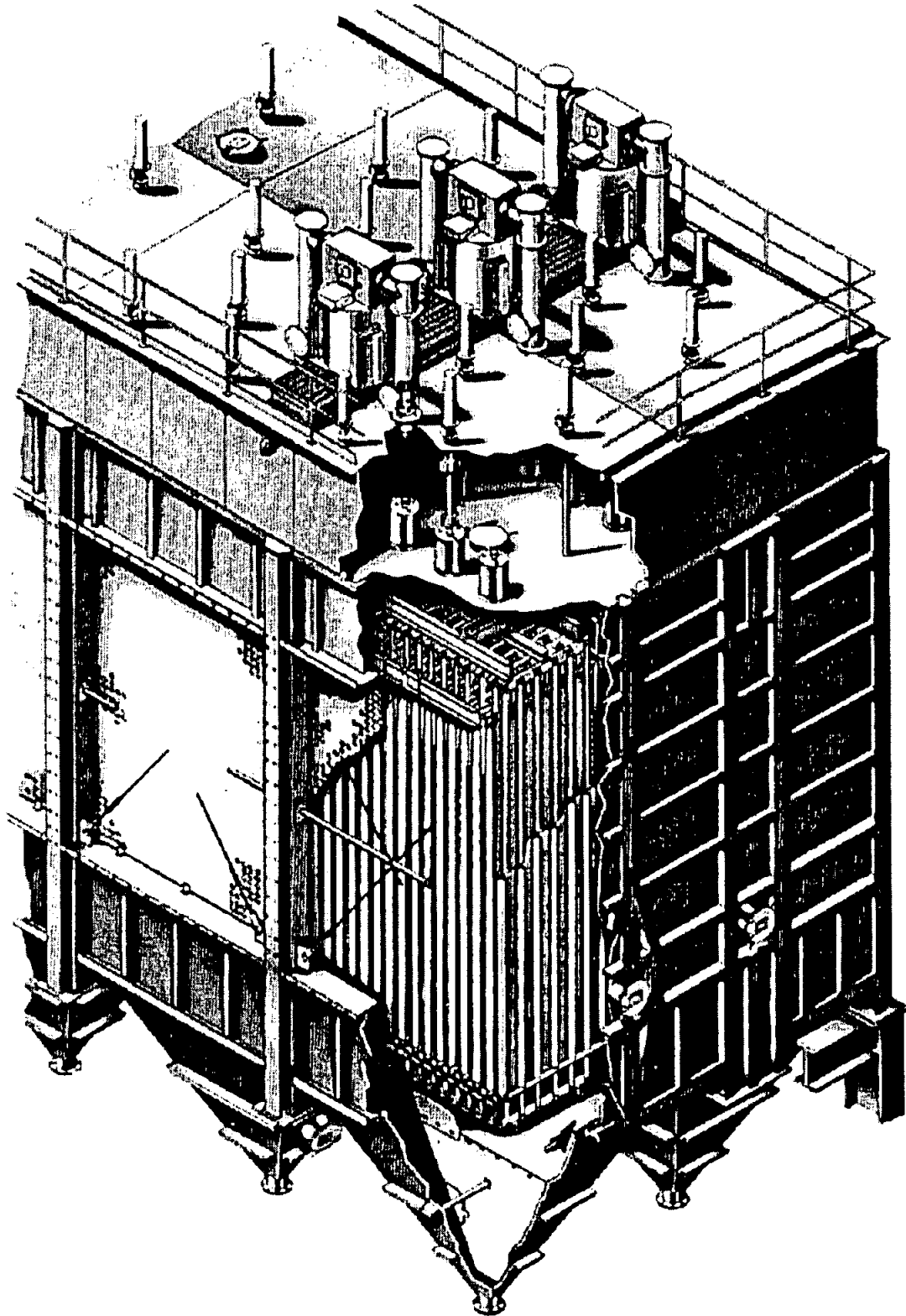


Figura 2.3 - Precipitador Americano Típico (con compartimientos de aisladores)

Tolvas

Las tolvas se usan para guardar temporalmente el polvo recolectado antes de desalojarlo. Generalmente están diseñadas con una inclinación de 60° para permitir la caída libre del polvo de la parte superior de la tolva a la apertura de descarga. Algunos fabricantes añaden aparatos para facilitar y agilizar la descarga. Los diseños de las tolvas generalmente incluyen puertas de acceso que facilitan la limpieza, inspección y mantenimiento de las tolvas.

El polvo recolectado en las tolvas puede crear problemas especiales si no se remueve rápida o continuamente. Por ejemplo, cuando el polvo se enfría y hay humedad presente, se endurece y se vuelve difícil de remover. Otro problema es el sobrellenado. Cuando se acumula tanto polvo que éste toca la parte inferior de los electrodos de descarga, puede crear un corto en todo un campo eléctrico. Otros problemas de puenteo, y apelmazamientos también pueden ocurrir requiriendo que algún tipo de fuerza los remueva. Se pueden usar placas de golpeo, orificios para introducir varas, vibradores, sacudidores y bocinas acústicas. También, es muy importante saber que a altas temperaturas el polvo se vuelve fluido. Se debe tener mucho cuidado al abrir la puerta de la tolva o cuando se trate de desalojar el material.

Aparatos de Descarga

Generalmente se considera como parte del sistema de la tolva, el aparato de descarga es necesario para vaciar la tolva y puede ser manual o automático. A menudo se instalan aparatos de descarga automáticos continuos que pueden incluir válvulas rotatorias, puertas de descarga, transportadores sin fin y neumáticos.

Las válvulas rotatorias son los aparatos de descarga más comúnmente usados. La válvula se diseña con una rueda con aspas montada en un eje y girada por un motor. La válvula rotatoria es similar a una puerta giratoria: las aspas forman un sello hermético con la estructura, y el motor lentamente mueve las aspas para permitir la descarga del polvo que está en la tolva.

Los transportadores sin fin o neumáticos, en precipitadores grandes, remueven el polvo de las tolvas usando una válvula rotatoria hacia un transportador neumático para acarrear el polvo a camiones o lugares de almacenamiento.

Zona de Tratamiento

La zona de tratamiento es el área dentro del precipitador donde el flujo de gas se distribuye y el polvo se carga y recolecta. Los componentes mecánicos internos incluyen aparatos de distribución, electrodos de descarga y de recolección.

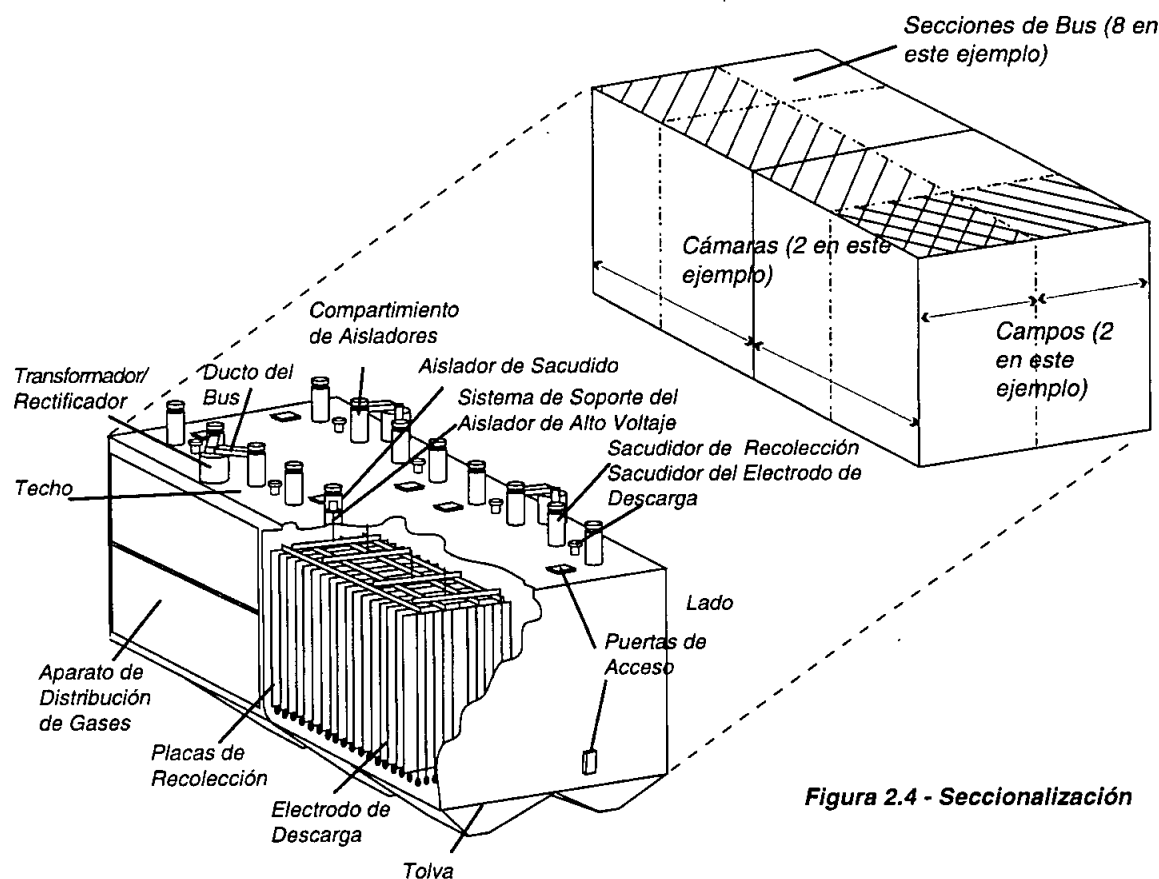


Figura 2.4 - Seccionalización

La zona de tratamiento se divide típicamente en dos cámaras, campos y celdas (secciones de bus). Esto se llama seccionalización como se muestra en la Figura 2.4. Las divisiones son importantes ya que se relacionan a áreas que están energizadas por el T/R. La celda o sección de bus es la zona de tratamiento más pequeña que se puede aislar eléctricamente. La seccionalización necesaria para un precipitador en particular depende del tamaño y volumen de gas. La importancia de la seccionalización se analiza en detalle en el Capítulo 4.

Placas Perforadas

Estas placas se instalan en el ducto de entrada, justo antes del área de tratamiento. Las placas perforadas se usan para ayudar a distribuir el flujo del gas de entrada a través de la sección transversal del precipitador. Al igual que los otros componentes internos, las placas perforadas también requieren limpiarse para que la acumulación de polvo sea mínima.

Electrodos de Descarga

El electrodo de descarga es el componente que genera la descarga de corona en el precipitador. En la mayoría de los precipitadores, los electrodos de descarga son cables delgados, redondos de 0.13 a 0.38 cm (0.05 a 0.15 pulg.) de diámetro, aunque los hay disponibles en una variedad de estilos (los estilos de marco o ducto rígido se comentan más adelante). El tamaño y forma de los electrodos depende de los requerimientos mecánicos del sistema, el fabricante y tipo de proceso del sistema. La mayoría de los diseños americanos tienen cables delgados, redondos para la generación de corona como se muestra en la Figura 2.5, pero muchos fabricantes también han usado cable enrollado, con púas, cuadrado y otras configuraciones. Cada estilo de cable tiene sus características propias de generación de corona. Típicamente, los cables tienen 0.25 cm (0.1 pulg.) de diámetro.



Figura 2.5
Electrodo de Descarga

El sistema de electrodos de descarga (Figura 2.6) consiste de cables que cuelgan verticalmente, sostenidos en la parte superior y tensionados por un peso en la parte inferior. Los cables están hechos generalmente de acero al carbón, pero también se pueden construir de acero inoxidable, aleaciones de titanio y aluminio. Los pesos son de acero moldeado y pesan entre 7 y 11.4 kg (15 - 25 lbs).

Los cables modernos generalmente están suspendidos en ambos extremos, al marco de soporte superior y al peso en la parte inferior. El soporte superior debe ser sólido para evitar arqueos internos y fallas prematuras en los cables.

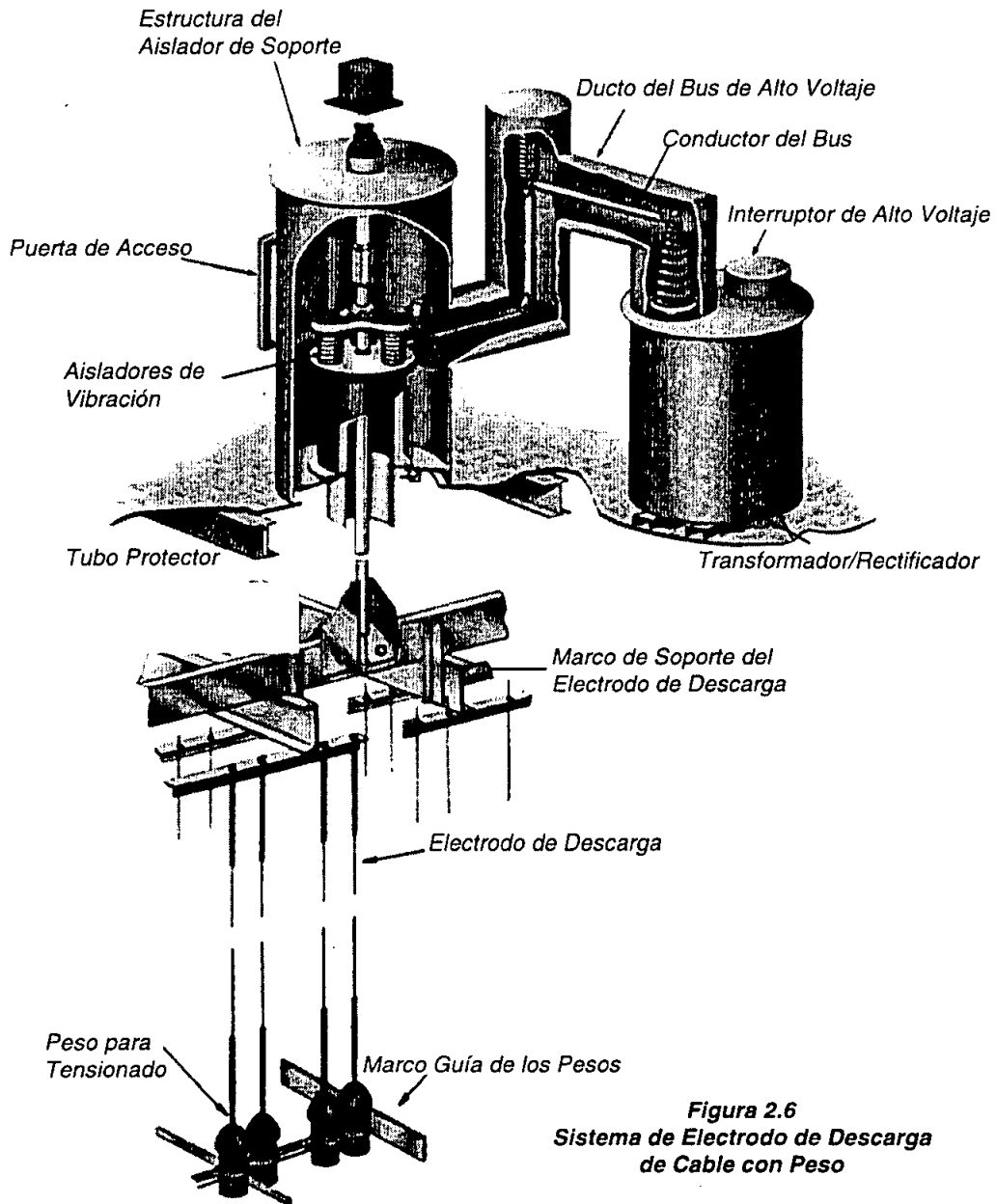
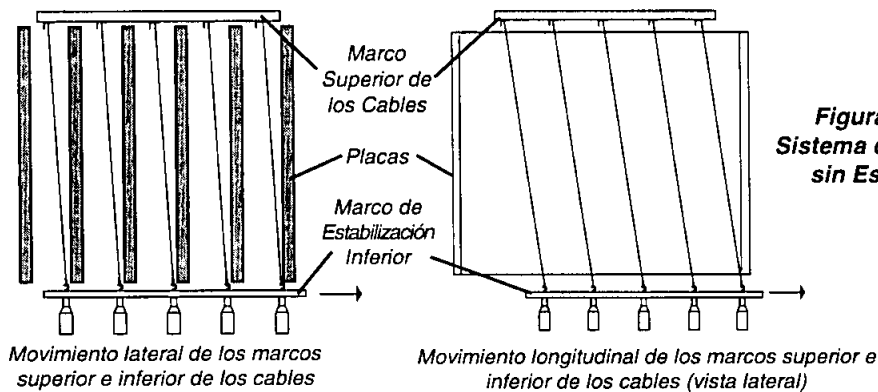


Figura 2.6
Sistema de Electrodo de Descarga de Cable con Peso



Figuras 2.7 (Izquierda) y 2.8
Sistema de Electrodo de Descarga sin Estabilización Adecuada

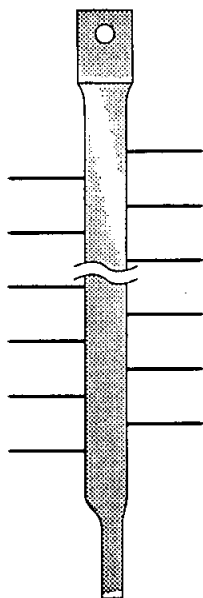


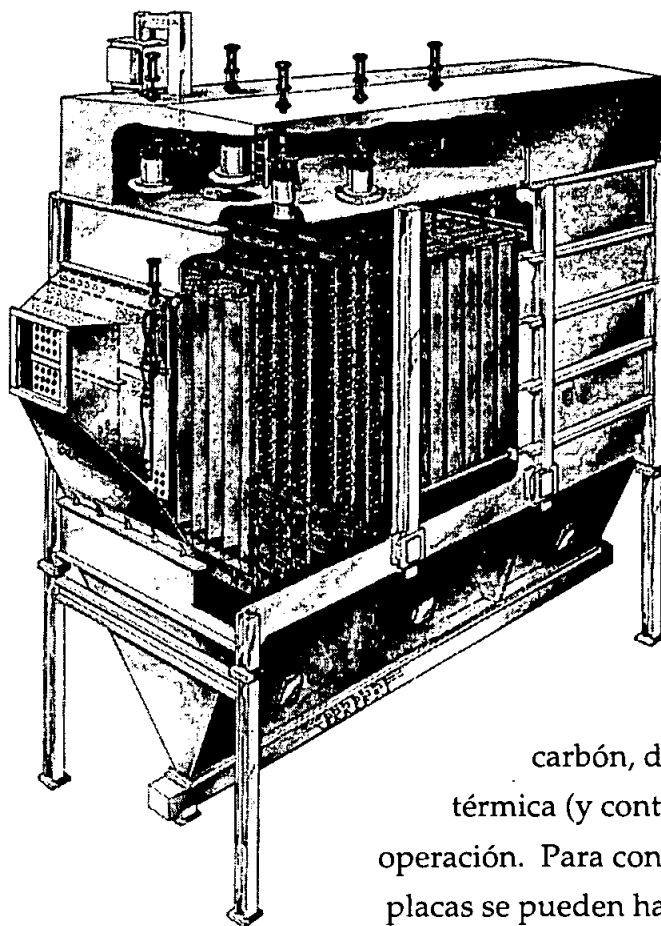
Figura 2.9
Electrodo de Descarga de "Ducto con Picos"

Debido a las condiciones dinámicas internas del precipitador, los cables oscilan bajo la influencia de las fuerzas aerodinámicas y eléctricas. Los pesos deben tener suficiente masa para evitar esto. El movimiento de los pesos está limitado por el marco guía de los electrodos. El marco inferior también evita que los pesos se caigan a la tolva (en caso de que el cable se rompa). (Figura 2.6) La estabilización adecuada del marco inferior es crítica para una operación exitosa. Si no se logra estabilizar el marco, habrá un deslizamiento del marco, ver Figuras 2.7 y 2.8.

Nuevos descubrimientos en los diseños de los electrodos han

generado el electrodo rígido, también llamado "ducto con picos". La Figura 2.9 muestra este tipo de electrodo. La Figura 2.10 muestra un precipitador Americano Típico con Electrodos Rígidos.

Figura 2.10 Diseño Típico Americano de Electrodo Rígido



Electrodos de Recolección

La mayoría de los precipitadores usan electrodos de recolección (placas) porque este método es el más eficiente en costos que los otros estilos de superficies de recolección para extraer el polvo de grandes volúmenes de gas. Las placas

generalmente se forman de acero al

carbón, diseñadas para soportar expansión térmica (y contracción) de $\pm 1/4"$ durante su operación. Para condiciones de gases especiales, las placas se pueden hacer de acero inoxidable o aleaciones.

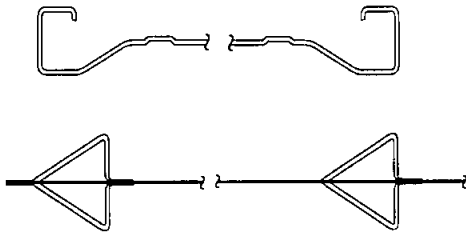


Figura 2.11 - Diseños de Placa Unitaria (Vista Superior)

Hay dos estilos básicos de placas, y dentro de éstos, hay diferentes métodos de diseño y construcción. Las placas unitarias (Figura 2.11) son hojas sólidas de acero, generalmente tienen soportes para reforzar la placa. En algunos casos, los soportes actúan como placas difusoras y ayudan a reducir la reintroducción directa del flujo de gas. Esta construcción ayuda permitiendo la distribución uniforme de las fuerzas de sacudido, y también ayuda a reducir el pandeo.

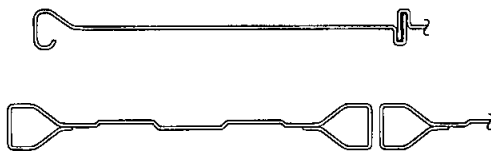


Figura 2.12 - Diseños de Placa Parcial (Vista Superior)

Las placas parciales (Figura 2.12) son otro estilo de construcción, donde se cuelgan "tiras" de acero rolado para constituir una placa completa. Este estilo de placa generalmente se sacude de la parte inferior y se encuentra principalmente en los precipitadores estilo Europeo.

En general, las placas varían de 0.12 a 0.15 cm (0.048 a 0.060 pulg., o calibre 18 a 16) de grosor, y están espaciadas de 22 a 40 cm (9 a 16 pulg.) entre sí. Estos son los valores normales para precipitadores de alta eficiencia. Las placas generalmente son de 6 a 12 m (20 a 40 pies) de alto.

Las placas están sujetas a numerosos problemas, el más común es el pandeo. Este se ocasiona por estratificación en el precipitador debido a la temperatura, entrada de humedad (o aire ambiente), calentamiento o enfriamiento excesivo y rápido, poco espacio para permitir la expansión térmica. El pandeo de las placas crea otros problemas adicionales como variaciones en los espacios eléctricos y menor eficiencia de recolección. Las placas están sujetas a fuerzas de sacudido que, si la placa no se diseña adecuadamente, pueden contribuir al pandeo y reducir la integridad donde la placa está sostenida. La corrosión es otro problema frecuente en las placas.

Para asegurar un largo servicio o vida útil de las placas, es importante inspeccionarlas mínimo cada año. Asegúrese que las placas tengan espacio suficiente para expansión térmica, que las barras de sacudido estén alineadas adecuadamente y que la temperatura de operación esté por encima del punto de condensación.

Dependiendo de la aplicación, las placas pueden durar hasta 20 años. Las placas usadas en un precipitador de un molino de recuperación de papel pueden durar hasta 10 años; aplicaciones de cemento duran en promedio 12 años.

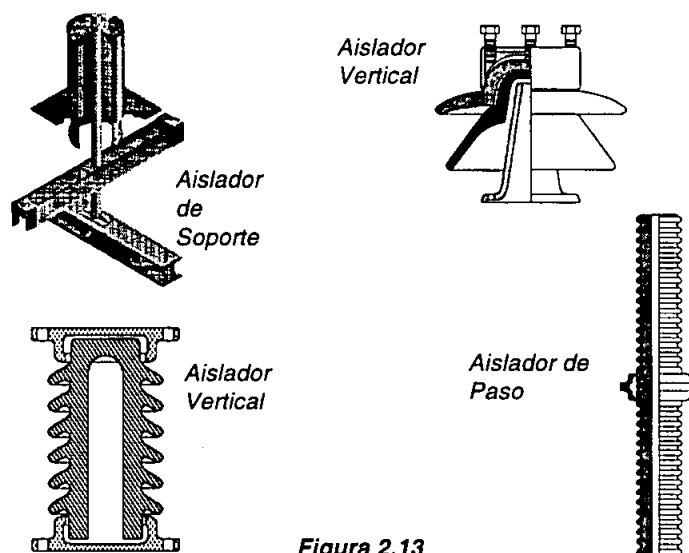


Figura 2.13
Aisladores Típicos

Otros Componentes Importantes

Hay otros componentes importantes que son integrales para la operación del precipitador, como el sistema eléctrico de alto voltaje (comentado en el siguiente capítulo). Otros componentes y sistemas incluyen, aisladores, sistemas de purga de aire, sacudidores/vibradores y controles de sacudido.

Aisladores

Las líneas de bus de alto voltaje que acarrean la electricidad del T/R al precipitador están aisladas de la tierra por medio de aisladores eléctricos. Éstos están hechos de plástico no-conductivo o material de cerámica, y sirven para varias cosas incluyendo el soportar los marcos de alto voltaje, aisladores de sacudido y aisladores verticales y de estabilización. La Figura 2.13 muestra algunos diseños típicos de aisladores.

Los aisladores de soporte físicamente sostienen y aíslan eléctricamente el alto voltaje de la tierra. Los aisladores de sacudido transmiten las fuerzas mecánicas necesarias para crear vibración o un choque en el sistema de alto voltaje, pero están aislados eléctricamente de los sacudidores de los electrodos. Los estabilizadores ayudan a

evitar el deslizamiento del marco o rejilla inferior, y los aisladores verticales sostienen el bus de alto voltaje aislado de la estructura a tierra del precipitador.

Los aisladores pueden sufrir grandemente debido a las condiciones ambientales extremas - especialmente humedad- y se pueden cuartear o romper si no se les dá mantenimiento. Por ejemplo, si los aisladores no se mantienen libres de polvo y hay humedad, esto puede ocasionar que los altos voltajes se "fugen" a tierra, debilitando el aislador. Los aisladores deben estar limpios y operar por encima del punto de condensación para evitar este problema.

Sistemas de Purga de Aire

Los sistemas de purga de aire se usan generalmente para proporcionar aire caliente al penthouse o compartimientos de aisladores, a niveles de presión más altos que en el precipitador, para ayudar a reducir la cantidad de polvo y humedad en los compartimientos. Esto ayuda a prolongar la vida útil de los aisladores de alto voltaje reduciendo cuarteaduras y chispeos a través de los aisladores.

Sacudidores y Vibradores

El polvo acumulado en las placas de recolección y cables se desaloja por sacudido. Los sacudidores o vibradores son componentes usados para crear impulsos mecánicos o vibraciones para limpiar las partes internas del precipitador. Los sacudidores y vibradores se pueden usar a distintos grados de intensidad y frecuencia dependiendo de las condiciones de operación.

Generalmente, los sacudidores son los únicos componentes del precipitador que se clasifican como "partes móviles", y por lo tanto deben revisarse a menudo para verificar que operen adecuadamente. Los controles modernos de microprocesador automáticamente verifican la operación cada vez que el sacudidor se dispara. Los sellos de los sacudidores y ensambles de transmisión de sacudido también se deben monitorear.

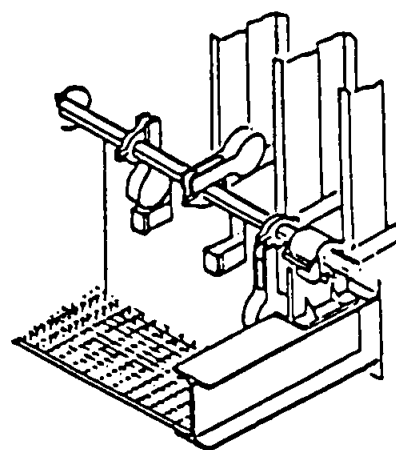


Figura 2.14 Sacudidor de Martillo

Al igual que el sistema eléctrico de alto voltaje, los sacudidores se pueden beneficiar por sistemas de control avanzados que permiten al usuario programar las secuencias de sacudido fácilmente, ajustar la intensidad de sacudido y otras funciones que mejoran la eficiencia global del precipitador así como la vida útil del sacudidor. Además, algunos controles de sacudido pueden interconectarse con los controles de voltaje o el programa de control remoto para obtener una limpieza más eficiente con menor reintroducción de polvo. Algunos sistemas de control de sacudido usan todavía algún tipo de controlador lógico programable (PLC).

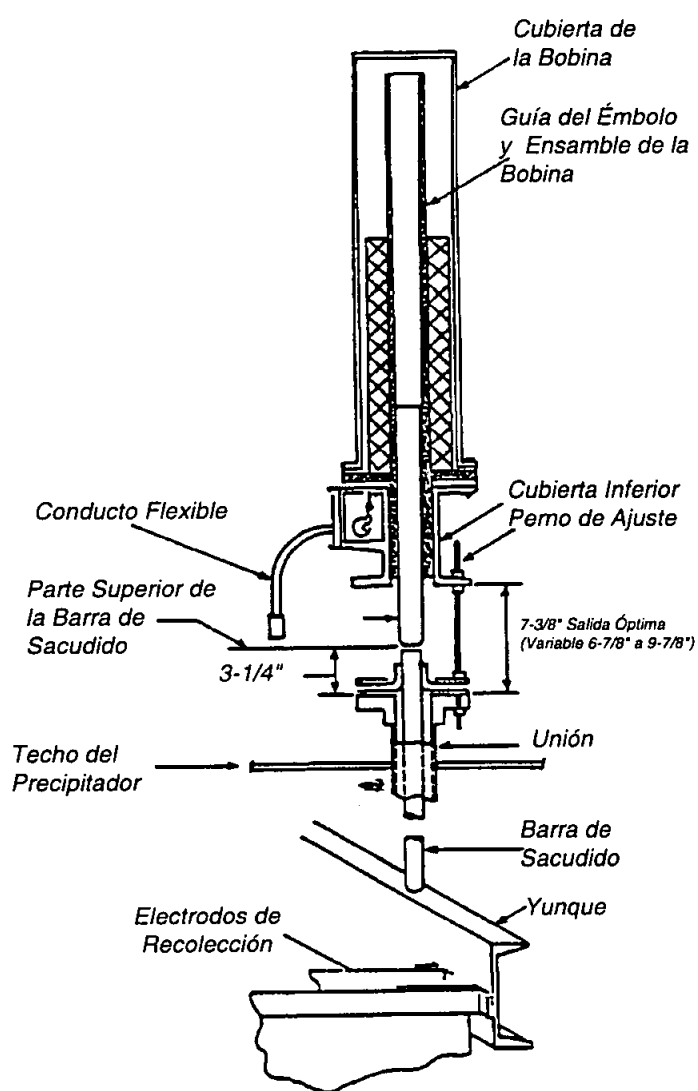


Figura 2.15
Sacudidor de Impulso Magnético

Martillo/Yunque (montado internamente)

Un sistema antiguo de sacudido usa martillos montados en un eje rotatorio como se muestra en la Figura 2.14. Cuando el eje se gira, los martillos caen (por gravedad) y golpean el yunque que está unido a las placas de recolección o al marco de alto voltaje. Los sacudidores se pueden montar en la parte superior o lateral de las placas de recolección. Los precipitadores de fabricantes europeos típicamente usan martillos y yunques para remover partículas de las placas de recolección.

La intensidad de sacudido está controlada por el peso de los martillos y la longitud del brazo de montaje de los martillos. La frecuencia del sacudido se puede

cambiar ajustando la velocidad del eje rotatorio y el período de descanso entre operaciones. Así, la intensidad y frecuencia del sacudido se pueden ajustar para condiciones variables.

El ajuste de la intensidad no es fácil de efectuarse ya que requiere el cambio de los martillos. Este sistema de sacudido está sujeto a desgaste por abrasión debido a que el mecanismo de rotación está en un ambiente muy hostil. El mecanismo de sacudido y los puntos de impacto de sacudido son las áreas que necesitan mayor mantenimiento en los precipitadores con este estilo de sacudido.

Impulso Magnético

Otro sistema de sacudido, usado en la mayoría de los precipitadores estilo Americano, consiste de sacudidores de impulso magnético. Este estilo de sacudidor (Figura 2.15) tiene un émbolo metálico que se levanta debido al pulso de corriente directa en una bobina. El sacudidor se energiza momentáneamente y el émbolo cae debido a la gravedad, golpeando una barra conectada a un número de placas dentro del precipitador. La frecuencia e intensidad del sacudido se pueden regular fácilmente con un sistema de control eléctrico. La frecuencia puede ser un golpe cada cierto número de minutos, o cada hora, con un amplio rango de intensidades. Otras opciones pueden incluir múltiples golpes en grupo, variando la intensidad de cada golpe respecto al anterior.

Los sacudidores de impulso magnético operan más frecuentemente pero a menor intensidad que los martillos rotatorios y yunques y se pueden ajustar y mantener más fácilmente.

Muchos precipitadores antiguos con este estilo de sacudido pueden lograr mejoras al añadir sacudidores. Ya que a veces se colocan muchas placas en un yunque - algo que los operadores e ingenieros deben evaluar.

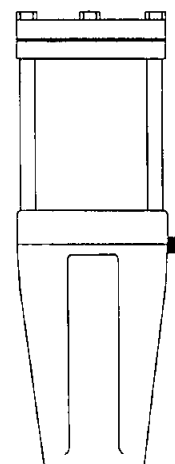


Figura 2.16
Vibrador

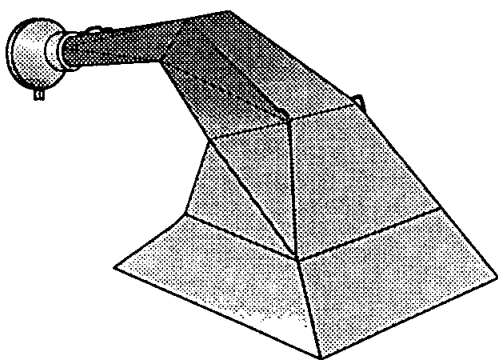


Figura 2.17 Bocina Acústica

Vibradores

Los electrodos de descarga también necesitan limpiarse para evitar la acumulación excesiva de polvo que interfiere con la generación de corona. Esto se logra generalmente usando vibradores eléctricos o de aire (Figura 2.16) (en diseños de cable con peso). Los vibradores se montan externamente sobre el techo del precipitador y se conectan por medio de barras a los marcos de alta

tensión que soportan los electrodos de descarga. Un aislador, localizado por encima de la barra, aísla eléctricamente los sacudidores mientras que mecánicamente transmite la fuerza de sacudido. Para los electrodos de descarga de estilo rígido, se pueden usar sacudidores de impulso magnético.

Los vibradores eléctricos requieren generalmente mayor mantenimiento que los vibradores neumáticos o que los sacudidores de impulso magnético. Sin embargo, el problema más común asociado con los sistemas de vibradores antiguos es la pérdida de energía en el mecanismo de transmisión.

Limpieza Acústica

Durante muchos años, las ondas sonoras se han usado para crear energía y trabajo. Esta energía se crea cuando un diafragma dentro de la sección del drive de una bocina se activa neumáticamente. Esto crea una vibración intensa para producir ondas sonoras que desplazan el aire al pasar. Dependiendo del nivel de energía producida por la bocina (normalmente expresada en decibeles [dB] y tono o frecuencia [ciclos por segundo], expresado en Hertz [Hz]), esta energía acústica puede proporcionar un método eficiente de aumentar la limpieza.

Mientras que las bocinas no son tan comunes como los vibradores y los sacudidores (Figura 2.17) éstas se han usado con éxito para complementar el sistema de sacudido. Instalándose en tolvas o áreas de ductos para remover la acumulación de polvo en esas secciones.

Precipitadores de Marco Rígido

Los precipitadores de marco rígido son de diseño Europeo y el sistema emisor (Figura 2.16) consiste de un marco sostenido en cuatro puntos. Mientras que este sistema es más estable y resistente que el de cables con peso del diseño Americano, son más difíciles de reparar cuando se necesita. Los diseños de marco rígido usan martillos para la limpieza de los electrodos lo que también implica más mantenimiento. Las secciones de bus en un precipitador de marco rígido son típicamente mayores a los diseños Americanos porque el alto costo del diseño implica economizar donde sea posible.

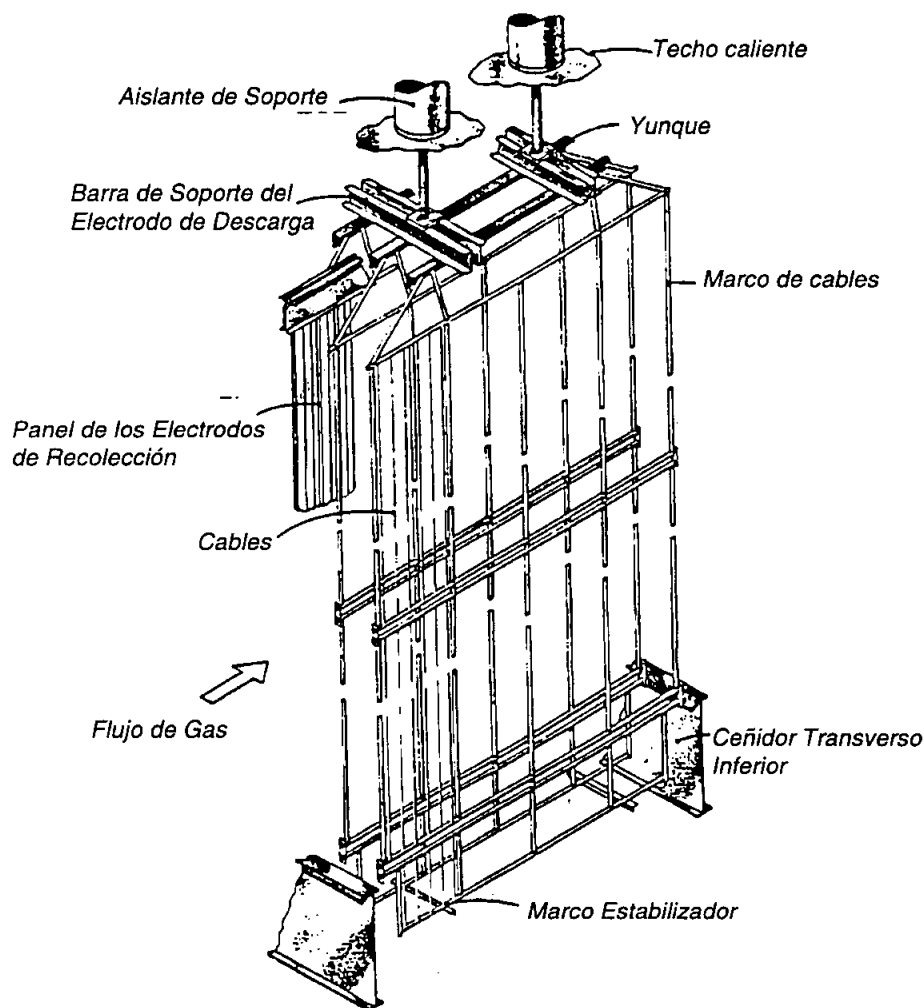


Figura 2.18
Ensamble Europeo Típico de un Marco de Cable Rígido

Los electrodos en un precipitador de marco rígido consisten de cables montados en un soporte. El propósito de este marco rígido es eliminar posible movimiento de los cables de descarga. Estos diseños se han usado con éxito en diseños de cable en los Estados Unidos. Una desventaja considerable del diseño Europeo es que un cable roto no es fácil de reemplazarse debido al espacio de acceso limitado.

Otras características de los diseños Europeos que deben notarse, como en el diseño Lurgi que se muestra en la Figura 2.18:

- La cubierta de los aisladores también proporciona soporte a la estructura del techo. Esto crea un diseño donde las placas de recolección están suspendidas directamente bajo el techo caliente así que no hay acceso interno por encima de las placas, lo que hace que las inspecciones y reparaciones sean más difíciles y caras.
- Los sacudidores están montados en los lados lo que usa espacio que podría usarse para aumentar el área de placas.

En la Figura 2.19 (página siguiente), se muestra el diseño de un AAF-Elex, con un electrodo semi-rígido. El diseño de este electrodo es similar al diseño de cable con peso ya que requiere un peso para tensionarse.

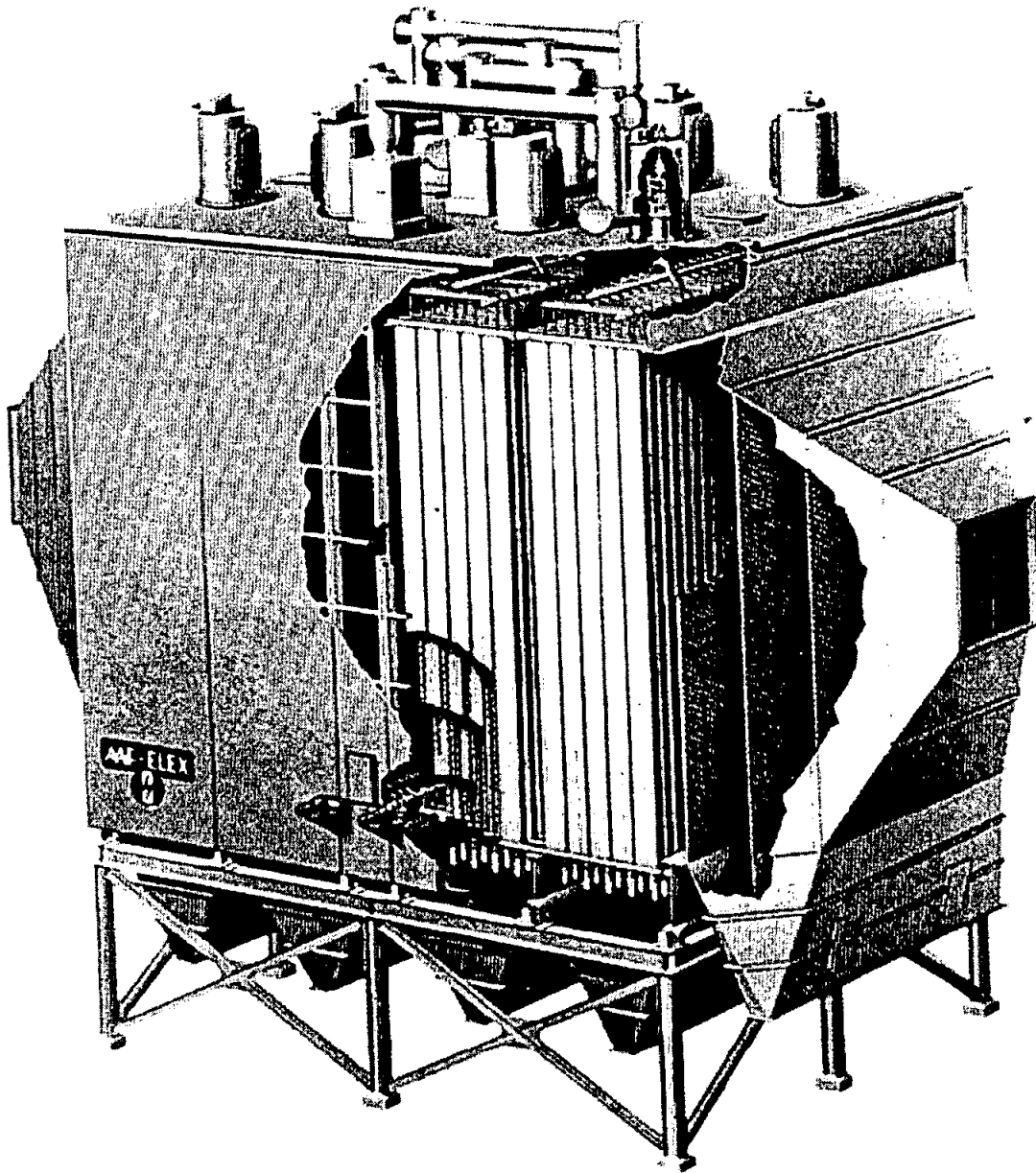


Figura 2.19
Precipitador Electrostático AAF-ELEX



CAPÍTULO 3

Componentes y Sistema Eléctrico del Precipitador

SISTEMA Y COMPONENTES ELÉCTRICOS

Para maximizar la entrada de poder, recolección de partículas y eficiencia eléctrica, la fuente de poder de un precipitador moderno opera el campo del precipitador a su nivel de energía más alto, aumentando la carga de partículas del sistema y sus capacidades de recolección. Esto está limitado por varios factores tales como::

- Los límites eléctricos del equipo
- Chispeo en el campo
- El punto de corona invertida
- La combinación adecuada de los componentes eléctricos a la carga del precipitador
- Formas de onda de voltaje y corriente

En los análisis mas básicos, la fuente de poder del precipitador debe operar en sus límites de diseño - ya sea la capacidad eléctrica del transformador/rectificador o el límite del precipitador en función a el voltaje de sobre-chispa.

Debido a que el sistema eléctrico de alto voltaje es el poder del proceso de precipitación, la selección de componentes y operación de la fuente de poder del precipitador es crítica para lograr y mantener una alta eficiencia.

Frederick Cottrell demostró en sus experimentos que un voltaje de CD obtenido de una fuente de poder filtrada no era apropiado para usarse en precipitadores debido a proporcionar una respuesta de chispa insatisfactoria. Como resultado, las fuentes de poder de los precipitadores modernos entregan salidas sin filtrar o pulsantes. La filtración de la salida de voltaje de la fuente de poder ocurre cuando se conecta al campo del precipitador. Esto sucede porque el campo, en efecto, forma un capacitor consistente de dos conductores separados por un material aislante. Este concepto se vuelve importante cuando, durante la operación, ocurre chispeo. Las chispas y arcos (chispeo prolongado), causan un rompimiento momentáneo, y en efecto, hacen que el gas se vuelva conductor en vez de aislante. La importancia de este principio se verá más adelante.

Componentes de la Fuente de Poder

Los componentes principales del sistema de la fuente de poder alto voltaje incluyen transformador/rectificadores, controles de voltaje automáticos, reactores limitadores de corriente y rectificadores controlados de silicón. Este capítulo se enfoca en estos componentes y el circuito de la fuente de poder del precipitador.

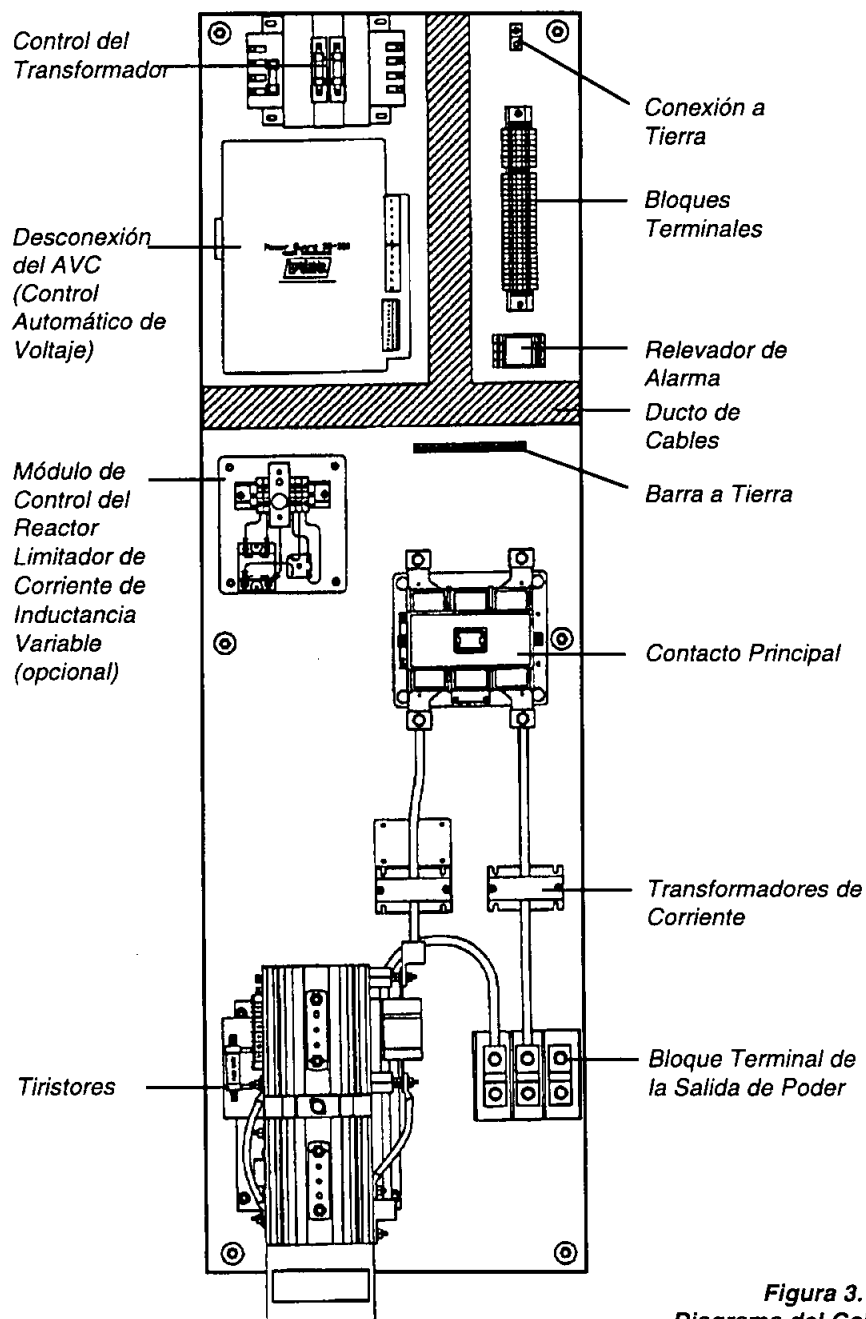


Figura 3.1
Diagrama del Gabinete de Control Típico

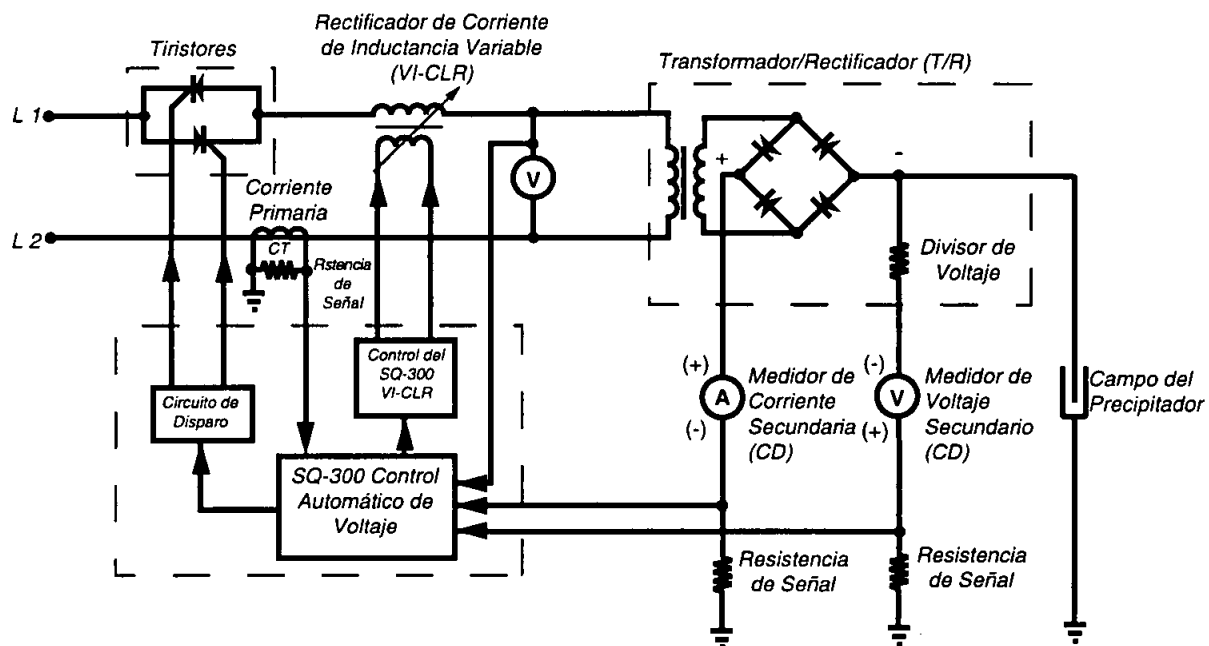


Figura 3.2
Circuito de la Fuente de Poder Típica de un Precipitador

La Figura 3.1 muestra el diagrama del gabinete de control típico, mientras que la Figura 3.2 muestra el circuito de la fuente de poder típica de un precipitador.

Interruptor Principal

Este es un circuito de rompimiento que proporciona una llave de desconexión y protección de sobre corriente de la fuente de poder principal al gabinete de control.

Contacto Magnético

El contacto magnético se localiza generalmente en el gabinete de control individual y proporciona una protección de sobre carga para el transformador/rectificador. Actúa magnéticamente desde el botón de inicio y alto.

Rectificadores Controlados de Silicón

Los rectificadores controlador de silicón o Tiristores (SCRs) se usan para controlar la potencia de CA al transformador/rectificador. Son aparatos semiconductores de estado sólido que actúan como un interruptor con una compuerta que permite que

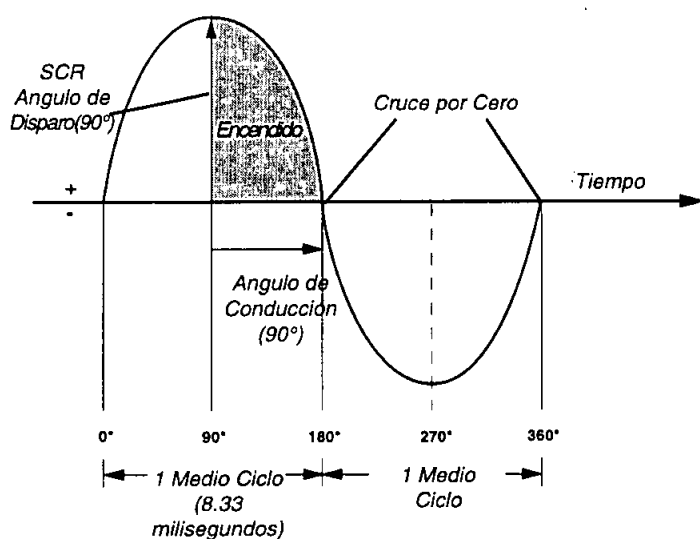


Figura 3.3 - Onda Senoidal

sean encendidos eléctricamente. Debido a que los tiristores conducen sólo en una dirección, se conectan dos tiristores en una configuración paralela-inversa para proporcionar control en ambos ciclos positivo y negativo. La Figura 3.3 muestra una onda senoidal típica. Cada tiristor conduce alternativamente, uno en el medio ciclo positivo y el otro en el negativo. El control automático de voltaje (típicamente basado en un microprocesador) determina cuál tiristor se enciende y en qué momento durante ese medio ciclo.

Al encender un tiristor, éste permanece encendido hasta que la corriente que fluye a través de él es menor a la "corriente de soporte", generalmente al final del medio ciclo (cruce por cero). No se puede apagar el tiristor de ninguna otra manera.

El punto donde el tiristor se enciende, o "dispara" se mide en grados a partir del inicio del medio ciclo y se llama ángulo de disparo. La parte del medio ciclo durante el cual el tiristor conduce también se mide en grados a partir del punto de disparo hasta que termina la conducción y se llama ángulo de conducción. Se logra el control de la potencia con tiristores al variar el punto sobre el medio ciclo donde se enciende cada tiristor.

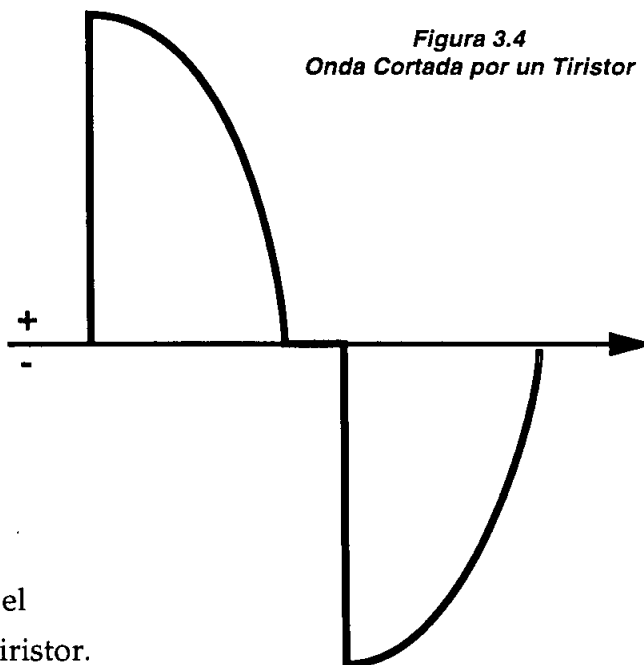


Figura 3.4 Onda Cortada por un Tiristor

La naturaleza del tiristor es tal que su salida no es una onda senoidal ya que cada medio ciclo está "cortado" en el punto donde el tiristor se "disparó" o empezó a conducir. La Figura 3.4 muestra estas formas de onda cortadas.

Una de las funciones del reactor limitador de corriente es de "cambiar la forma" de la forma de onda para que se parezca más a una onda senoidal. La forma de onda es esencial para la eficiencia eléctrica y se analizará posteriormente en este capítulo.

Reactor Limitador de Corriente

El reactor limitador de corriente (CLR) es un inductor de valor fijo usado en serie con el transformador/rectificador. Muchos CLR's usados en aplicaciones de precipitadores tienen conexiones que se pueden cambiar manualmente para proporcionar una selección limitada de valores de inductancia. Algunos CLR's pueden variar sus valores de inductancia automáticamente.

La función principal de los CLR's es limitar el flujo de corriente durante el chispeo. Si ocurre una chispa mientras el tiristor está conduciendo, la chispa continúa hasta que el SCR deja de conducir, hacia el final del medio ciclo. Durante este tiempo, el T/R prácticamente tiene un corto en el secundario debido a la chispa, y esto se refleja en el primario. Un T/R correctamente diseñado tiene un circuito de

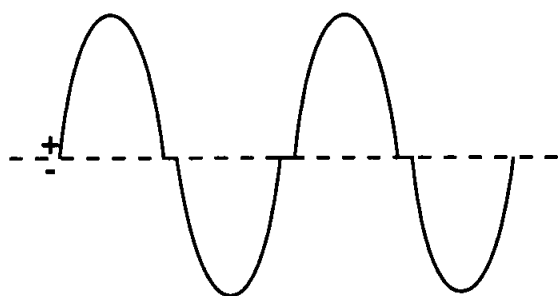


Figura 3.5 - Forma de Onda Modificada por CLR

impedancia, aún con una chispa, pero no es suficiente para limitar la corriente significativamente. Como el tiristor está conduciendo y el T/R tiene baja impedancia debido a la chispa, el único elemento del circuito que controla el flujo de corriente es el CLR. Por consiguiente, es importante que el CLR tenga la inductancia correcta para controlar la corriente de chispa.

Otra función del CLR es dar forma a las ondas de voltaje y corriente. Para eficiencias eléctricas y de recolección óptimas, la forma de onda del voltaje y corriente del primario del T/R debe ser una onda senoidal. Bajo ciertas condiciones (tales como operación a un 70% de la potencia) los tiristores crean distorsiones en la

forma de onda. El CLR se necesita para filtrar y restaurar la forma de onda a una senoidal (Figura 3.5). Debido a esta función, es importante seleccionar el valor de inductancia apropiado. Históricamente, el valor de inductancia del CLR se ha determinado usando el 50% de la impedancia del T/R. Algunos CLRs tienen la habilidad de cambiar sus valores de inductancia eléctrica y automáticamente en base a las necesidades del sistema. Este proceso ayuda a mantener las formas de onda apropiadas para una operación eléctrica eficiente. Estos CLRs con patente pendiente están disponibles de un fabricante y se llaman Reactores Limitadores de Corriente de Inductancia Variable (VI-CLR).

Transformador/Rectificador

El Transformador/Rectificador es una combinación de un transformador y rectificador de onda completa. El transformador aumenta 480 VCA de entrada a 45 y 60 kVCD promedio. El rectificador convierte la corriente alterna de salida del secundario del transformador a una onda completa rectificadora de CD. Un T/R típico usado en un precipitador está lleno de aceite para enfriamiento y aislamiento. Los valores típicos son:

Voltaje Primario RMS:	400 Volts CA (VCA)
Corriente Primaria RMS:	240 Amps (A)
Voltaje Promedio Secundario:	45,000 Volts CD (VCD) prom.
Corriente promedio Secundaria:	1500 miliamperes (mA)
Razón de vueltas del transformador:	1:135

En la mayoría de los precipitadores industriales, se conecta un T/R a una o dos secciones de bus del precipitador y está conectado a los electrodos de descarga por una línea de bus. La línea de bus es un conductor que lleva el alto voltaje del T/R a los electrodos de descarga. El conductor puede ser cable aislado o tubería de acero. Está cubierto por un ducto de bus para proteger la línea de alto voltaje del ambiente y evitar que ésta presente un riesgo de seguridad. Las líneas de bus de alto voltaje están aisladas del marco y estructura del precipitador por medio de un plástico no conductor o con material de cerámica.

Controles Automáticos de Voltaje

El Control Automático de Voltaje (AVC) está conectado a los tiristores y controla su operación. También mide el voltaje primario y secundario y los niveles de corriente. Muchos AVCs proporcionan la habilidad de establecer límites para el voltaje y corriente primarios y secundarios, razón de chispas y nivel de restablecimiento de potencia (el nivel de potencia que se logra inicialmente después de la supresión de una chispa o arco). Algunos AVCs también monitorean otras variables incluyendo: factor de forma, conducción de fracción secundaria, potencia aparente y otras características avanzadas.

La función principal de los AVCs es proporcionar los pulsos de interrupción que disparan los tiristores, poniéndolos en estado de conducción. Determina en qué

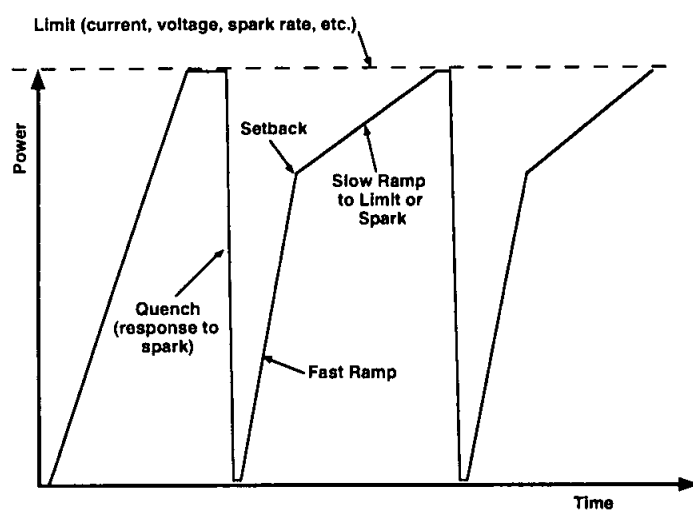


Figura 3.6 - Operación del AVC

parte del medio ciclo eléctrico disparar el SCR para lograr el control de potencia. Por ejemplo, si el AVC dispara cada tiristor a 90 grados, el ángulo de conducción sería de 90 grados, y exactamente la mitad de la potencia de CA se aplicaría al T/R. De esta manera es como el AVC proporciona control de potencia para asegurar la operación del equipo dentro de sus límites eléctricos. Aún más, si el AVC no dispara un SCR en un medio ciclo, la salida de la fuente de poder del precipitador se interrumpe

durante ese medio ciclo. Esto permite interrumpir o "suprimir" las chispas cuando el AVC las detecta.

En esencia, la mayoría de los AVCs operan en base a límites de operación programados, o con la razón de chispas. El AVC permite el paso de potencia al precipitador hasta llegar al límite u ocurrir una chispa (Figura 3.6). Si se alcanza el límite y no hay chispas o arcos, se está introduciendo la potencia máxima al precipitador (los límites dependen de los valores del límite de operación del T/R). Si ocurre una chispa o arco, el AVC interrumpe el flujo de potencia en el siguiente cruce por cero de la onda senoidal. Este es el único caso en que puede hacer que el tiristor no conduzca. Esto se llama supresión. El tiempo que el AVC suprime es un valor ajustable por el usuario. Cuando la chispa o arco se ha extinguido, el AVC empieza lo que se llama "rampa rápida" o nivel de restablecimiento. Esto permite que la potencia aumente rápidamente en el precipitador. El nivel de restablecimiento es un valor ajustable por el usuario que es un porcentaje de la potencia completa. El restablecimiento se usa para no aplicar la potencia total inmediatamente para evitar otra chispa o prolongar la chispa o arco existentes. Es importante notar que estas acciones ocurren en centésimas de segundo. Cuando el nivel de restablecimiento se alcanza, el AVC lentamente aplica más potencia hasta alcanzar otro límite o chispa. La eficiencia del precipitador puede depender en gran modo de qué tan bien y rápido opera el AVC.

Los controles de voltaje también se pueden controlar desde una localidad remota usando una computadora central personal o maestra que opere programas de control remoto. Los AVCs están unidos por medio de comunicaciones en serie a una computadora. Los programas de control remoto pueden incluir muchas características que permiten al usuario guardar datos específicos de control, ver la tendencia de los parámetros de operación, generar curvas de funcionamiento y otras funciones.

Medidores

Los medidores también se incluyen en el circuito de control y monitorean las variaciones en la entrada de potencia eléctrica. Como ya se mencionó, algunos AVCs monitorean y muestran en pantalla varios parámetros. El estándar de monitoreo más usado consiste de:

Voltímetro Primario – Este medidor mide el voltaje de entrada al transformador en volts CA. El voltaje de entrada varía de 0 a 480 volts CA. Sin embargo, los precipitadores más modernos usan 400 a 480 volts como límite de voltaje primario. El medidor se localiza a través de la bobina primaria del transformador.

Amperímetro Primario – este medidor lee la corriente primaria que fluye en el transformador en amperes. Está localizado en el circuito de potencia primario. Las lecturas del voltaje y corriente primarios dan la potencia de entrada al transformador/rectificador.

Voltímetro Secundario – Este medidor lee los volts CD del voltaje de operación entregados a los electrodos de descarga. El medidor está localizado entre el lado de salida del rectificador y los electrodos de descarga.

Amperímetro Secundario – Este medidor lee la corriente entregada a los electrodos de descarga en miliamperes. El amperímetro secundario está localizado entre el rectificador de salida y el módulo de control automático. La combinación del voltaje y corriente secundarios proporciona la potencia de entrada a los electrodos de descarga.

Medidor de Chispas – este medidor cuenta el número de chispas por minuto en un campo del precipitador.

Los medidores analógicos descritos anteriormente se mantienen en servicio aún cuando el AVC tiene pantallas digitales y muestra la misma información.

Reactores de Núcleo Saturable

Un reactor de núcleo saturable es un componente que actualmente se considera como tecnología obsoleta, reemplazado por la combinación de tiristores/CLRs. Sin embargo, este componente todavía se puede encontrar en algunos precipitadores.

El reactor de núcleo saturable es una impedancia variable magnética, usada para controlar la potencia CA al T/R. Su impedancia varía al aplicar potencia CD a la bobina de control. Cuando esta potencia aumenta, la impedancia del reactor de

núcleo saturable disminuye. Esto aplica más potencia al T/R. En cambio, cuando la potencia CD de la bobina de control disminuye, la impedancia del reactor de núcleo saturable aumenta, aplicando menos potencia al T/R. Por lo tanto, el control de la potencia al precipitador se logra controlando la CD de la bobina de control del reactor de núcleo saturable.

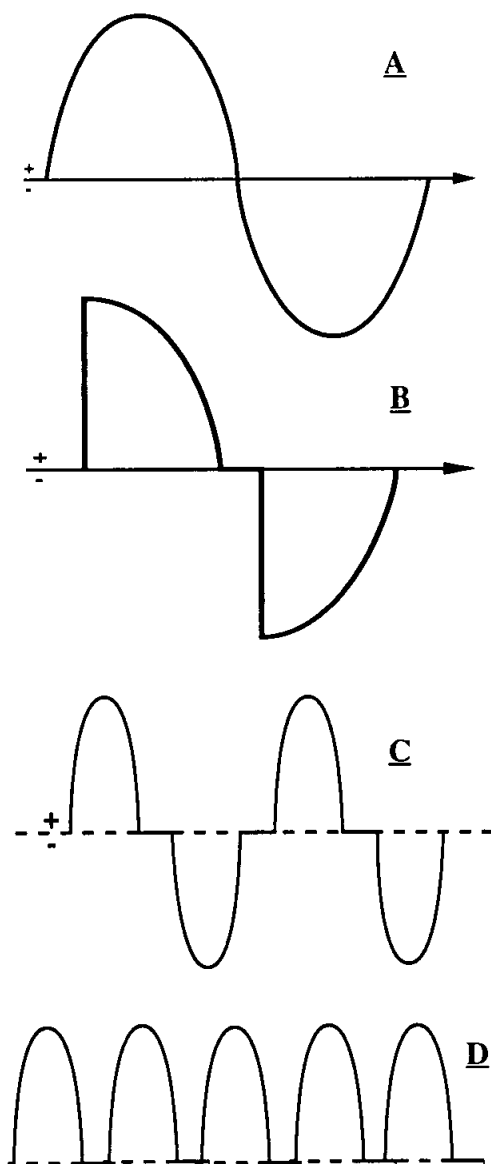
Como el reactor de núcleo saturable es un aparato magnético, es inherentemente lento en reaccionar a cambios en la bobina de control. Por ejemplo, cuando ocurre una chispa, la potencia CD se elimina de la bobina de control, y puede tardar hasta 300 milisegundos para que la potencia CA se reduzca lo suficiente en el T/R para extinguir la chispa. (Recuerde que medio ciclo son 8.33 milisegundos.) Por lo tanto, durante este tiempo, la chispa continúa y puede ocasionar daños a la circuitería o electrodos del equipo.

Los reactores de núcleo saturable, aún sin potencia CD aplicada a la bobina de control, tienen grandes fugas. Esto es debido a que se aplica alguna potencia CA al T/R aún cuando esté en estado de apagado. Esto tiende a alimentar el desarrollo de arcos y chispas en el campo del precipitador debido a que la potencia nunca se puede apagar completamente. Para solucionar este problema, se usan resistencias de 10 al 15% del valor de potencia del T/R colocadas en paralelo con el primario del T/R. Esto significa que hay un desperdicio de energía debido a que el reactor de núcleo saturable alimenta arcos y chispas. El reactor de núcleo saturable, siendo un aparato de impedancia variable y teniendo muchas pérdidas internas, también disipa energía en forma de calor.

Con estos problemas, y otros que serán estudiados en la siguiente sección, es fácil ver por qué muchos operadores de precipitadores están cambiando a tiristores/CLRs.

Eficiencia Eléctrica y Transferencia de Potencia

Como ya se mencionó, los tiristores, CLRs y T/R tienen valores estándares que pueden variar de una unidad a otra - aún en el mismo precipitador. Para una operación eléctrica eficiente, es importante que cada componente en serie esté en relación adecuada a los demás y al trabajo que debe realizar en el precipitador (recolectando polvo).



Los T/Rs están generalmente diseñados para proporcionar una densidad de corriente específica, en base a el número de pies cuadrados de superficie total de área de recolección y el tipo de polvo a recolectar. La densidad de corriente es la cantidad de corriente secundaria en cualquier campo específico del precipitador, por unidad de área de placa y se mide en miliamperes. Los tiristores y CLR's, a su vez, se escogen en función del tamaño del T/R. La batalla continua para lograr la eficiencia eléctrica se gana o pierde al acoplar estos componentes y ajustar y operar adecuadamente el AVC.

Gralmente, los que trabajan con precipitadores miden su eficiencia eléctrica en función de la opacidad; si el precipitador es eficiente, recolecta el polvo y la opacidad será baja. Sin embargo, esto puede llevar a un sentido falso de seguridad. El precipitador puede estar

recolectando el polvo lo suficientemente bien para mantener bajas lecturas de opacidad, sin embargo estar usando la potencia de manera altamente ineficiente aumentando así los costos de operación.

Midiendo la Eficiencia Eléctrica

Al inicio de este capítulo se comentó que la forma de onda que entra al sistema de la línea de voltaje típica de 480V, 60 Hz es senoidal (A). Cuando entra a los tiristores es cortada en el lado positivo y negativo (B). La forma de onda entra el CLR y se modifica para parecerse a una onda senoidal (C), y entra al T/R donde se aumenta y rectifica en corriente directa (D).

En esencia, mientras la forma de onda permanezca parecida a una onda senoidal durante el proceso, mejor trabajo produce en el precipitador. El factor de forma de onda y conducción de fracción secundaria son las dos mediciones eléctricas comúnmente usadas para evaluar las formas de onda del precipitador.

Factor de Forma Primario

El factor de forma primario es una medida de qué tanto se parece la forma de la corriente del primario del T/R a una onda senoidal ideal. El factor de forma primario se determina al medir los valores RMS y promedio de la corriente primaria en el T/R. Después se divide el valor RMS de la corriente primaria entre el valor promedio. En forma de ecuación:

$$\text{Factor de Forma Primario} = \text{Corriente Primaria RMS} / \text{Promedio}$$

Para una onda senoidal ideal, existe la siguiente relación:

Valor RMS: 0.707 valor pico de la onda senoidal

Valor Promedio: 0.637 valor pico de la onda senoidal

Factor de Forma: $0.707 / 0.637 = 1.11$

Por lo tanto, el factor de forma de una onda senoidal ideal es 1.11. Las fuentes de poder de precipitadores que operan a sus valores nominales de placa del T/R están diseñadas normalmente para operar a un factor de forma de 1.2. Con fuentes de poder que usan tiristores para controlar la potencia, el factor de forma primario aumenta cuando se reduce el nivel de potencia. La forma de la corriente primaria del T/R se distorciona, pareciéndose menos a la forma senoidal ideal debido a la acción de los tiristores.

El Control Automático de Voltaje Power Guard SQ-300, fabricado por PrecipTech, Inc., automáticamente mide y reporta el factor de forma primario a cualquier nivel de potencia, pero el siguiente ejemplo muestra cómo determinar manualmente el factor de forma primario de un T/R que opera a su rango máximo. Se puede seguir el mismo procedimiento a cualquier nivel de potencia. El valor de placa del T/R para este ejemplo es el siguiente:



Principios Básicos de los Precipitadores Electrostáticos

Voltaje Primario RMS:	400 VCA
Corriente Primaria RMS:	240 Amps (A)
Voltaje Secundario Promedio:	45,000 VCD
Corriente Secundaria Promedio:	1500 miliamps (mA)

1. Si no se conoce el número de vueltas del T/R, se puede determinar con los datos de placa usando el voltaje secundario promedio y el voltaje primario RMS. Primero, convierta el voltaje secundario promedio multiplicándolo por 1.19. Divida el voltaje secundario RMS entre el voltaje primario RMS. Para este ejemplo, se usarán los valores máximos de placa de 45,000 volts promedio y 400 volts RMS.

$$n = \text{Voltaje Secundario Promedio} * 1.19 / \text{Voltaje Primario RMS}$$

$$n = 45,000 * 1.19 / 400$$

$$n = 53,550 / 400$$

$$n = 133.88$$

2. Se puede determinar la corriente primaria leyendo el medidor de la corriente secundaria que corresponde a la corriente secundaria promedio en el campo del precipitador. Multiplicándolo por el valor de placa de 1500 mA.

$$\text{Corriente Primaria Promedio} = (n) * \text{Corriente Secundaria}$$

$$\text{Corriente Primaria Promedio} = 133.88 * 1500 \text{ mA}$$

$$\text{Corriente Primaria Promedio} = 200.82$$

3. El valor de la corriente primaria RMS se puede leer directamente del medidor de la corriente primaria que viene con el control del precipitador si este medidor es tipo de aspa de acero, ya que estos medidores responden al valor RMS de la corriente primaria. Por ejemplo, usando un valor de placa máximo de 240 mA.

$$\text{Factor de Forma Primario} = \text{Corriente Primaria RMS} / \text{Corr. Sec. Promedio}$$

$$\text{Factor de Forma Primario} = 240 / 200.82$$

$$\text{Factor de Forma Primario} = 1.2$$

Conducción Fraccional Secundaria

En un transformador ideal, la forma de la onda de corriente alterna primaria del transformador se reproduce continuamente en el secundario. En caso del T/R, la forma de onda se rectifica o convierte a CD.

La conducción fraccional secundaria es la medida de qué tanto se acerca la forma de la corriente secundaria del T/R a una onda senoidal rectificada ideal. Existe la siguiente relación entre el factor de forma primario y la conducción fraccional secundaria:

$$\text{Conducción Fraccional Secundaria} = (1.11 / \text{Factor de Forma})^2$$

Para una onda senoidal ideal, existe la siguiente relación:

Valor RMS: 0.707 valor pico de la onda senoidal

Valor Promedio: 0.637 valor pico de la onda senoidal

Factor de Forma: $0.707 / 0.637 = 1.11$

Conducción Fraccional: $(1.11 / 1.11)^2 = 1.00$

Por lo tanto, la conducción fraccional secundaria de una onda senoidal rectificada ideal es 1.00. Las fuentes de poder del precipitador operando a sus valores máximos de placa del T/R están diseñadas normalmente para operar a una conducción fraccional de .86. Esto corresponde a un factor de forma primario de 1.2. Esto significa que cada pulso de corriente secundaria es mayor a cero el 86% del tiempo.

Recuerde que la fuente de poder del precipitador no está filtrada, por lo tanto es pulsante. Con las fuentes de poder que usan tiristores para control, la conducción fraccional secundaria disminuye cuando se reduce el nivel de potencia. La forma de la corriente secundaria del T/R se distorciona pareciéndose menos a una onda senoidal rectificada ideal.

Al igual que con el factor de forma primario, el Control Automático de Voltaje SQ-300 mide y reporta automáticamente la conducción fraccional secundaria a cualquier nivel de potencia. La conducción fraccional secundaria se puede

determinar manualmente midiendo la corriente secundaria con un osciloscopio. Para la mayoría de los precipitadores industriales operando con campos negativos como Research Cottrell, Joy Western y otros, el osciloscopio se conecta para medir el voltaje creado por la corriente secundaria a través de una resistencia. La resistencia se conecta entre la terminal positiva del T/R y tierra. Los precipitadores United McGill son una excepción ya que operan con campo positivo. Para estas unidades, el osciloscopio se conecta para que mida el voltaje creado por la corriente secundaria a través de la resistencia conectada entre la terminal negativa del T/R y tierra.

Cuando el osciloscopio se conecta, se mide el tiempo que el pulso de corriente secundaria es mayor a cero. Después, esta duración se divide entre la duración máxima posible. Para una línea de frecuencia de 60 Hz, la duración máxima posible es de 8.33 milisegundos, el período de un medio ciclo. Expresado en forma de ecuación, tenemos:

$$\text{Conducción Fraccional Secundaria} = t/T$$

donde t = duración de un pulso de corriente secundaria
T = máxima duración posible

Importancia de la Forma de Onda del Precipitador

Se puede lograr una máxima eficiencia de recolección y eléctrica controlando adecuadamente no sólo la amplitud del voltaje CD y corriente en el campo del precipitador, pero también su forma. Esto se puede lograr manteniendo un factor de forma primario (≈ 1.2) y conducción fraccional secundaria alta ($\approx .86$).

Eficiencia de Recolección

El efecto del factor de forma primario en la corriente secundaria se puede expresar en forma de ecuación:

$$\text{Corriente Sec. Prom.} = \text{Corriente Pri. RMS} / (n) * \text{Factor de Forma Primario}$$

donde n = número de vueltas del T/R

La corriente secundaria promedio es inversamente proporcional al factor de forma primario. Por lo tanto, la amplitud de la corriente secundaria se puede aumentar reduciendo el factor de forma primario. Al reducir el factor de forma primario se aumenta la conducción fraccional secundaria:

$$\text{Conducción Fraccional Secundaria} = (1.11/\text{Factor de Forma})^2$$

El aumento en la conducción fraccional proporciona carga adicional en el campo del precipitador formando un capacitor, dos conductores separados por un material aislante. Así se reduce el rizado de la forma de onda del voltaje secundario, prácticamente aumentando el voltaje secundario.

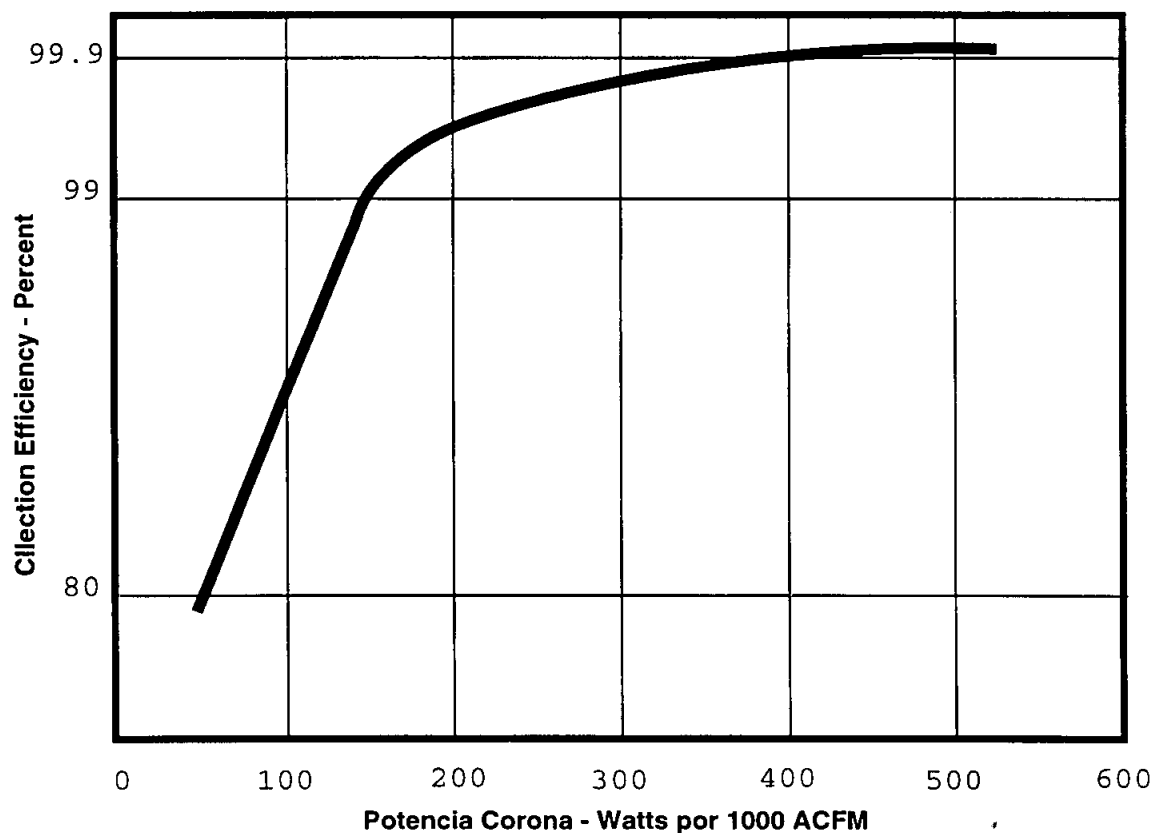


Figura 3.7 - Eficiencia de Recolección vs. Potencia de Entrada

Al aumentar la amplitud del voltaje y corriente promedio en el campo del precipitador aumentará la recolección de partículas ya que se aumenta la carga y la atracción hacia las placas. El efecto neto es un aumento a la potencia de corona. La potencia de corona aproximada se puede presentar en la ecuación siguiente:

$$[(V_p + V_m) / 2] * (i_{pro})$$

Donde V_p = Voltaje Secundario Pico

V_m = Voltaje Secundario Mínimo

i_{pro} = Corriente Secundaria Promedio

Esta ecuación muestra que la potencia de corona y la colección de eficiencia se pueden aumentar al aumentar la corriente o voltaje secundarios, o ambos. La relación típica entre la potencia de corona y la eficiencia de recolección del precipitador se muestra en la Figura 3.7.

En muchos casos, el límite práctico de qué tanto se puede aumentar el voltaje secundario depende de las chispas en el campo del precipitador. Ocurre chispeo cuando se alcanza el voltaje de chispas. Este voltaje se determina por muchos

factores, incluyendo composición química del gas. Cuando se alcanza este nivel, el voltaje de campo del precipitador no se puede incrementar más.

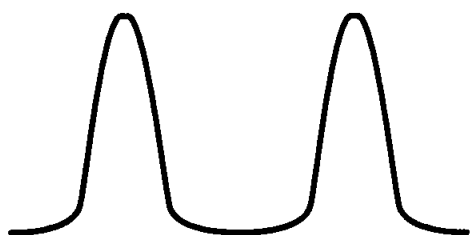


Figura 3.8 - Forma de Onda de Núcleo Saturable

La fuente de poder ideal de un precipitador aplicará potencia de tal manera que el valor pico del voltaje y corriente secundarios estén cerca de los valores promedio. Esto producirá

voltajes y corrientes promedio máximos antes que ocurra chispeo. Si las formas de onda del precipitador tienen picos muy altos y promedios muy bajos, la medición de la forma de onda del precipitador mostrará un factor de forma alto (>1.2) y conducción fraccional secundaria baja ($<.86$). Ocurrirá chispeo en los picos y el campo tendrá un voltaje y corriente secundarios promedio bajos para la recolección de partículas.

Reactores de Núcleo Saturables y Formas de Onda

El reactor de núcleo saturable, en conjunto con otros componentes del circuito, tales como el campo del precipitador y el T/R, dan forma a las ondas de voltaje y corriente presentes en el precipitador. Como hemos visto, la forma adecuada de estas ondas es crítica para la recolección eficiente. La forma de onda de la corriente secundaria de núcleo saturable medida con un osciloscopio muestra que ésta es angosta y con picos (Figura 3.8). Además, cuando se mide su duración durante el ciclo alto, tiene una conducción fraccional entre 40 y 70%. Esto es comparable a la combinación tiristor/CLR con formas de onda anchas y bajas con conducción fraccional del 86%.

Estas formas angostas y con picos resultan en la queja más común de operación de sistemas de reactores de núcleo saturable, ya que entregan muy poca potencia al campo del precipitador antes que ocurra chispeo. El resultado es baja recolección de eficiencia.

El sistema de reactor de núcleo saturable es un medio ineficiente de controlar la potencia, y debido a su efecto en las formas de onda del precipitador, la recolección de eficiencia es generalmente baja. Sin embargo, estos sistemas son muy confiables. Cuando no es recomendable cambiarlo por tiristores/CLR debido al costo o restricciones de tamaño, se puede obtener un mejor funcionamiento colocando un control automático de voltaje basado en microprocesador.

Eficiencia Eléctrica

La amplitud del voltaje y corriente promedio en el campo del precipitador se pueden aumentar al mantener un factor de forma primario bajo y conducción fraccional secundaria alta. Esto ocurre sin aumentar la potencia de entrada. El efecto del factor de forma primario en la corriente primaria RMS se puede expresar en la ecuación siguiente:

$$\text{Corriente Primaria RMS} = \text{Corriente Sec. Prom. (n)} * \text{Factor de Forma Pri.}$$



donde n = número de vueltas del T/R.

Para tener una corriente secundaria de salida y un rango de recolección de partículas constantes, se puede reducir la potencia de entrada. Esto se logra reduciendo el factor de forma primario a un valor cercano a 1.2 y aumentando la conducción fraccional secundaria a un valor cercano a .86. Sólo se cambia la forma de entrada, no su amplitud. Esto proporciona una "afinación" del circuito eléctrico completo, incluyendo el campo del precipitador, al proporcionar un mejor acoplamiento de la carga a la línea mejorando la transferencia de potencia. Cuando el factor de forma aumenta y la conducción fraccional secundaria disminuye, la salida útil de la fuente de poder del precipitador disminuye respecto a su entrada.



CAPÍTULO 4

Teoría y Operación de los Precipitadores



TEORIA Y OPERACIÓN DE LOS PRECIPITADORES

En capítulos anteriores hemos revisado los componentes mecánicos y eléctricos de un precipitador. Este capítulo analizará en dos secciones la teoría de precipitación y su efecto práctico en las operaciones del precipitador:

1. Proceso de Precipitación
2. Factores Básicos que influyen la Operación del Precipitador

Sección 1 Proceso de Precipitación

El proceso completo de precipitación consiste de cinco pasos básicos que operan de manera continua:

1. Distribución del gas a la zona de tratamiento
2. Carga de partículas/descarga de corona (conducción de gas)
3. Recolección del polvo en las placas de recolección
4. Acumulación (aglomeración) del polvo
5. Desalojo del material recolectado

Cuando se cargan las partículas, emigran a la superficie de carga opuesta debido a la atracción electrostática (cargas opuestas se atraen). Las partículas recolectadas se remueven por sacudido (o lavado usando rociadores líquidos en algunos precipitadores). Esta secuencia de carga, recolección y desalojo se llama precipitación.

Antes de continuar nuestro análisis del proceso de precipitación y operaciones, es importante comprender cómo está construido el precipitador usando secciones. Esto se llama seccionalización.

Seccionalización Eléctrica

El funcionamiento del precipitador depende del número de secciones o campos instalados. El voltaje máximo de un campo dado depende de las propiedades del gas y polvo que se recolecta. Estos parámetros pueden variar de un punto a otro dentro de la unidad. Para mantener cada sección del precipitador trabajando con una alta eficiencia, se recomienda un alto grado de seccionalización. Se usan

múltiples campos para proporcionar nalización eléctrica. Cada campo tiene fuentes de poder y controles independientes para ajustarse a las variaciones de las condiciones del gas dentro de la unidad (Figura 4.1).

La necesidad de tener campos separados surge principalmente porque los requerimientos de entrada de potencia varían en distintas localidades dentro del precipitador. La concentración de masa de partículas es generalmente alta en las secciones de entrada del precipitador como resultado de la alta concentración de polvo que suprime la corriente de corona.

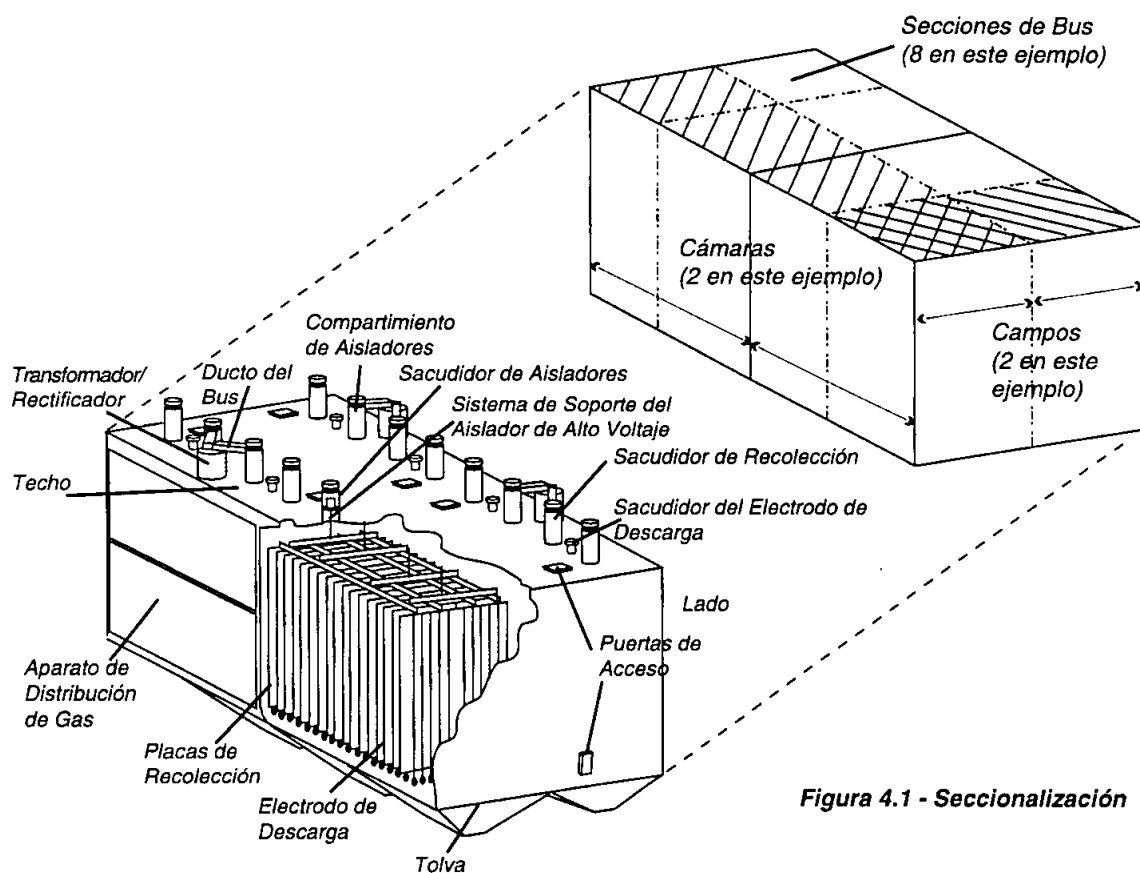


Figura 4.1 - Seccionalización

En los campos siguientes, la carga de polvo es menos concentrada. Consecuentemente, la corriente de corona fluye más libremente. La carga de partículas estará limitada por chispeo en los campos de entrada más que en los de salida. La potencia a las secciones de salida debe ser alta para recolectar las partículas pequeñas.



Si el precipitador tiene sólo una fuente, el chispeo excesivo limitaría la entrada a todo el precipitador. Esto resultará en una reducción general de la eficiencia de recolección.

El precipitador está dividido en series de secciones de bus o campos, energizados independientemente en dirección del flujo de gas. Cada campo actúa como un precipitador independiente precedido o seguido por otro precipitador independiente.

Cada campo tiene un T/R, controles de estabilización de voltaje y conductores de alto voltaje independientes que energizan los electrodos de descarga dentro del campo. Esto permite mayor flexibilidad a la energización del campo individual para condiciones variables dentro del precipitador. Sin embargo, para obtener una eficiencia de recolección mayor al 99%, el precipitador debe diseñarse con tres o más campos.

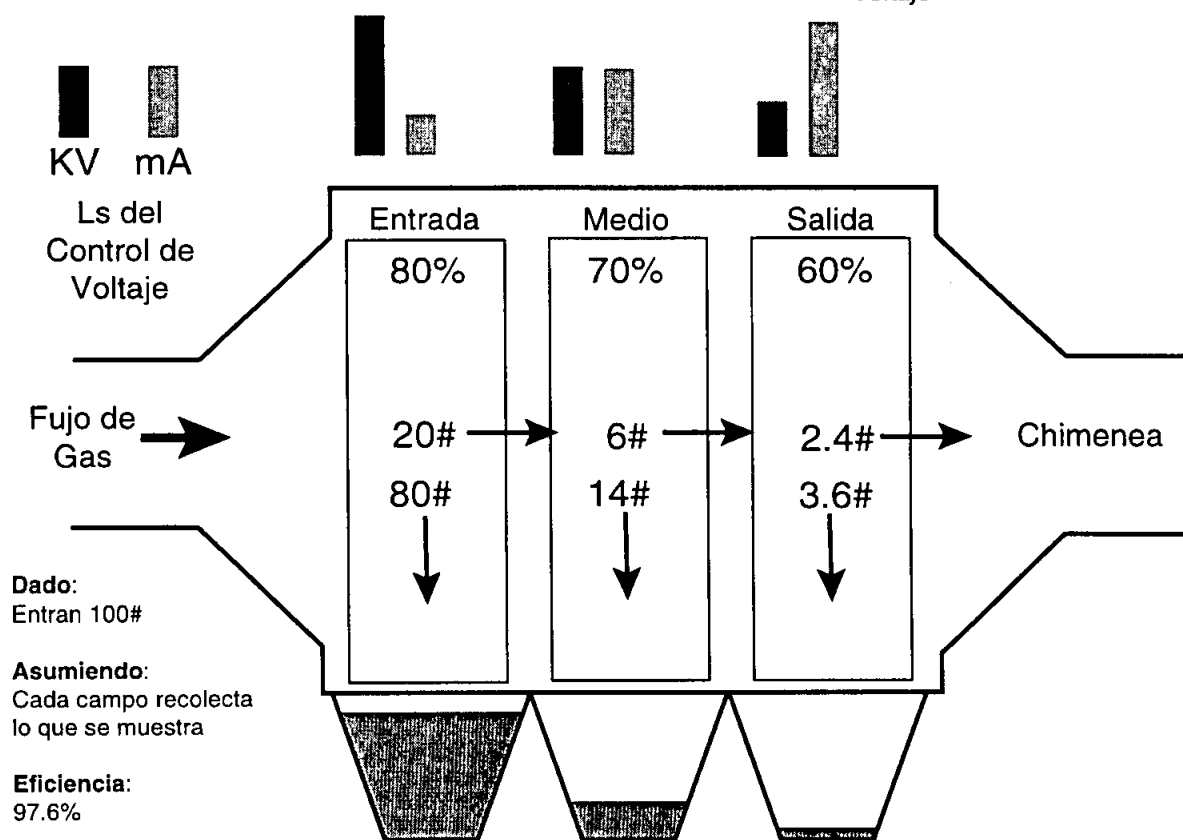
Otra razón importante para tener múltiples campos en un precipitador es la posibilidad de fallas eléctricas en uno o varios campos. Las fallas eléctricas pueden ocurrir como resultado de varios eventos como tolvas muy llenas, rompimiento de cables o falla de la fuente de poder. Los precipitadores con mayor número de campos dependen menos de la operación de los otros campos para obtener una alta eficiencia de recolección.

Seccionalización Paralela

En la seccionalización por campos, el precipitador está diseñado con una serie sencilla de campos independientes consecutivos. En la seccionalización paralela, la serie de campos está dividida eléctricamente en dos secciones para que cada campo tenga su componente paralelo. Esta división se conoce como celda. Un precipitador como el mostrado en la Figura 4.1 tiene dos secciones paralelas, cuatro campos y ocho celdas. Cada celda puede energizarse independientemente por una línea de bus desde su propio T/R.

Uón importante para tener seccionalización a través del ancho del precipitador es proporcionar una manera de manejar concentraciones de polvo, distribución de flujo de gas y temperaturas irregulares. En una caldera, las temperaturas del gas varían de un lado al otro, especialmente si se usa un precalentador rotatorio de aire en el sistema. Como la resistividad de la ceniza está en función de la temperatura del gas, este gradiente de temperatura puede causar variaciones en las características eléctricas del polvo de un extremo del precipitador al otro. El flujo de gas dentro del precipitador se puede estratificar, causando variaciones en la velocidad del gas y concentración del polvo afectando también las características eléctricas del polvo. De manera similar a usar varios campos, el usar secciones separadas de bus permite manejar mejor las variaciones del gas. Además, mientras más celdas tenga un precipitador, mejor será la probabilidad de que opere a su eficiencia de diseño.

Figura 4.2
Recolección de Polvo y Niveles de Voltaje



En la Figura 4.2 se puede ver cuánto polvo recolecta un precipitador típico en cada campo y los niveles correspondientes de voltaje y corriente producidos por los controles automáticos de voltaje para esos campos.

La observación más obvia es el hecho que el campo de entrada del precipitador recolecta más de 20 veces más polvo que el campo de salida. Este caso es muy común en los precipitadores. El campo de entrada también tiene la colección de eficiencia más alta en este precipitador de tres campos.

Aunque no es obvio, es importante notar qque el voltaje del precipitador (kilovolt) medido por el control automático de voltaje disminuye de campo a campo, mientras que la corriente (miliamperes) aumenta del campo de entrada al de salida. La razón de este fenómeno se llama "espacio de carga" y se analizará posteriormente.

Si pensamos en términos de cómo funciona un motor eléctrico en una planta, mientras más trabajo se requiere realizar, mayor es la corriente necesaria. En el ejemplo de este precipitador, la mayoría del polvo se recolecta en los campos con menores niveles de corriente (campo de entrada). Obviamente, un precipitador no sigue las reglas eléctricas usuales. Entonces, ¿qué determina los niveles de voltaje y corriente en cada campo? Primero, consideremos el funcionamiento del precipitador sin la presencia de polvo.

Cargando Partículas en el Precipitador

Debido a que la mayoría de los precipitadores tienen placas como electrodos de recolección, este arreglo se usará para describir cómo se desalojan las partículas del flujo de gas en un precipitador típico.

Las partículas suspendidas en el gas se cargan cuando pasan a través del precipitador debido a la corriente directa, pulsante, de alto voltaje aplicada al sistema de los electrodos de descarga. Los electrodos de descarga se cargan negativamente mientras que las placas de recolección se aterrizan. El voltaje aplicado se aumenta hasta que produce una corona de descarga. Si usted pudiera ver el interior del precipitador, vería un haz luminoso en los electrodos de descarga.

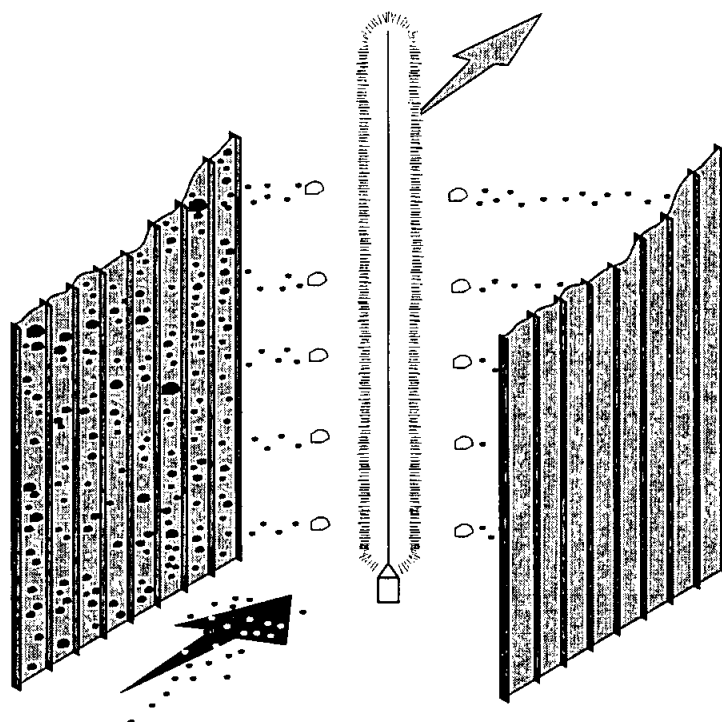


Figura 4.3 - Carga de Partículas

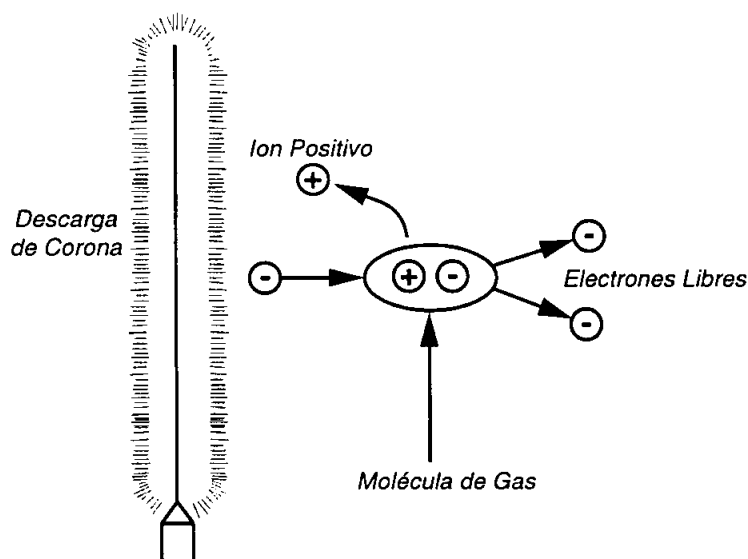


Figura 4.4 - Generación de Corona

La corona causa que las moléculas se ionicen. Los iones negativos chocan con las partículas suspendidas en el flujo de gas impartiendo una carga negativa. Las partículas cargadas negativamente emigran al electrodo de recolección y son colectadas (Figura 4.3).

Generación de Corona

La corona es un fenómeno de descarga en el que las moléculas gaseosas se ionizan por choques de electrones en la región de un fuerte campo eléctrico. La intensidad del campo eléctrico cerca del electrodo de descarga acelera los electrones libres presentes en el gas. Estos electrones adquieren suficiente velocidad para ionizar las moléculas de gas en colisión, produciendo un ion positivo y un electron adicional libre (Figura 4.4).

Los electrones libres crean más iones positivos y electrones libres cuando chocan con otras moléculas de gas. Este proceso se llama *multiplicación de avalancha* y ocurre en la región de luminosidad de corona (Figura 4.5). Esta avalancha continúa hasta que la fuerza del campo eléctrico disminuye hasta el punto donde la energía para perpetuar la ionización es

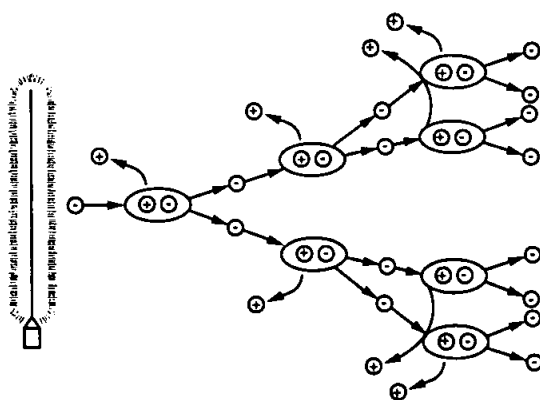


Figura 4.5
Multiplicación de Avalancha

insuficiente. En ese punto, los electrones no se mueven lo suficiente para ionizar las moléculas de gas al chocar con ellas.

Los lentos iones positivos emigran de regreso al electrodo de descarga negativo y forman nuevos electrones libres (emisión secundaria) al chocar con el cable de descarga o en el espacio inmediato. Los electrones

en movimiento producidos durante el proceso de avalancha siguen las líneas eléctricas hacia los electrodos de recolección.

Los electrones salen de la región de corona y entran a la región inter-eléctrica. La magnitud del campo eléctrico disminuye, y la velocidad de los electrones libres disminuye. Cuando los electrones chocan con las moléculas de gas en la región inter-eléctrica, son captados y se crean electrones negativos. Estos iones negativos sirven como el mecanismo principal para cargar el polvo.

Los iones negativos emigran hacia los electrodos de recolección a tierra. El espacio de carga que es una concentración estable de los iones negativos de gas, se forma en la región inter-eléctrica. Aumentos en el voltaje aplicado aumentarán la fuerza del campo y formación de iones hasta que ocurra una *chispa*. La chispa es una descarga eléctrica a través del gas entre los electrodos de descarga y de recolección. Causa una caída inmediata del campo eléctrico.

El precipitador debe operarse a voltajes lo suficientemente altos para que haya chispeo, pero no muy frecuente de manera que interrumpa el campo eléctrico constantemente. La razón promedio de chispas para un precipitador varía dependiendo del proceso y otras condiciones, pero generalmente es de 30 a 90 chispas por minuto. A esta razón, la ganancia en eficiencia asociada con el aumento de voltaje compensa por la disminución de ionización de gases debido a la caída del campo eléctrico. Para eficiencia óptima, la fuerza del campo eléctrico debe ser tan

alto como sea posible aplicando un alto voltaje a los electrodos de descarga causa un flujo de la corriente de corona del electrodo de descarga al electrodo de recolección.

Carga de Campo y Difusión

El movimiento de los iones negativos tiene dos efectos de carga principales en las partículas de polvo en la región entre electrodos. Estos efectos son la carga de campo y de difusión. Cada tipo de carga ocurre, pero una sola domina dependiendo del tamaño de la partícula.

La carga de campo domina en partículas de diámetro >1.0 micrones, mientras que la carga de difusión domina en partículas con diámetros entre 0.1 y 0.3 micrones. Una combinación de los dos mecanismos de carga ocurre en partículas que varían entre 0.3 y 1.0 micrones en diámetro. También es posible cargar partículas por electrones. En este caso, los electrones libres que no se combinan con los iones del gas se mueven a velocidades muy rápidas. Estos electrones chocan con la partícula cargándola. Sin embargo, este efecto carga muy pocas partículas.

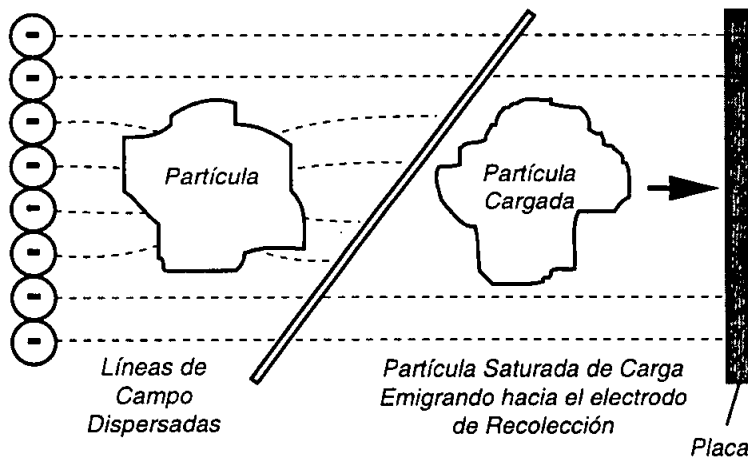


Figura 4.6 - Carga de Campo

Durante la carga de campo (Figura 4.6), las partículas entran el campo eléctrico, causando una dislocación local en el campo. Los iones negativos viajando a lo largo de las líneas de campo eléctrico chocan con las partículas

suspendidas cargándolas. Los iones continúan chocando con las partículas hasta que la carga sea suficiente para desviar las líneas eléctricas de ella. Esto evita que nuevos iones choquen con partículas de polvo ya cargadas. Cuando una partícula ya no recibe carga de iones, se dice que se ha saturado. Las partículas cargadas, saturadas emigran al electrodo de recolección y son recolectadas.

La carga de difusión se asocia con el movimiento Browniano al azar de los iones negativos del gas. Este movimiento al azar está relacionado a la velocidad de los iones del gas debido al efecto térmico: a mayor temperatura, mayor movimiento. Los iones negativos chocan con las partículas debido a su movimiento térmico al azar y las cargan. Ya que las partículas son muy pequeñas (submicrones), no hacen que el campo eléctrico se desvíe como en la carga de partículas. Estas partículas

pequeñas dependen del movimiento al azar de los iones negativos de gas para que las cargen negativamente. Las partículas ya cargadas emigran al electrodo de recolección.

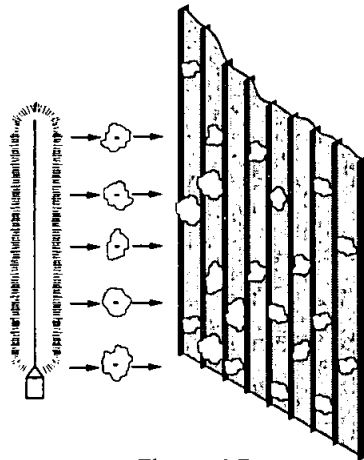


Figura 4.7
Descarga de Partículas en el Electrodo de Recolección

Descarga de Partículas en el Electrodo de Recolección

Cuando una partícula llega al electrodo de recolección, solo se descarga parcialmente. La carga se transfiere lentamente a la placa de recolección a tierra (Figura 4.7).

Una porción de la carga se realinea y contribuye a las fuerzas intermoleculares de cohesión y adhesión que fijan las partículas a las placas. Las partículas se mantienen en las placas por fuerza de adhesión. Las

partículas nuevas se adhieren a las partículas recolectadas por fuerzas de cohesión. La capa de polvo se acumula en la placa a un grosor de 0.08 a 1.27 cm (0.03 a 0.5 pulg.), cuando se inicia el ciclo de sacudido.

Es durante el proceso de la descarga de partículas en el electrodo de recolección que el fenómeno llamado corona invertida ocurre. La corona invertida es, en esencia, una segunda corona de descarga que surge del polvo recolectado. La importancia de la corona invertida se analizará después en este capítulo.

Sacudiendo las Partículas a la Tolva

El periodo de las placas del precipitador es necesario para mantener el proceso continuo de limpieza del gas. Las placas se sacuden generalmente al mismo tiempo que continúa el flujo de gas a través del precipitador y el voltaje aplicado permanece constante. Sin embargo, en algunos casos, se aumenta la eficiencia al reducir la

potencia temporalmente en un campo, y después iniciar el sacudido. Esto se llama "sacudido sin potencia" o "sacudido con potencia reducida".

Las placas se sacuden cuando la capa de polvo acumulada es gruesa (0.08 a 1.27 cm o 0.03 a 0.5 pulg.). Esto permite que la capa de polvo caiga de las placas en pedazos grandes y ayude a eliminar la posibilidad de reintroducción. La mayoría de los precipitadores tienen controles de sacudido ajustables que permiten variar la frecuencia e intensidad del sacudido de acuerdo a la concentración de polvo del gas.

El polvo suelto cae de las placas hacia la tolva, que es un cono de recolección con lados inclinados a 60° para permitir el flujo de polvo desde la parte superior de la tolva a la apertura de descarga. El polvo se debe desalojar seguido para evitar problemas de acumulación y puentes. En estos casos, el polvo es muy difícil de remover y puede causar que los campos hagan corto si la tolva se llena demasiado. La mayoría de las tolvas se vacían usando algún tipo de válvulas rotatorias, transportadores sin fin o neumáticos. También se usan bocinas acústicas en el proceso de desalojamiento.

Sección 2.

Factores que Influyen la Operación del Precipitador

Como ya se vió, para obtener la máxima eficiencia de recolección se necesita tener la corriente y voltaje máximos que el AVC pueda entregar a los campos del precipitador. Estos valores están limitados por rompimientos en el gas en el espacio entre electrodos (chispeo) o rompimientos de la capa de polvo (corona invertida).

Esta sección analizará estos y otros factores que afectan el funcionamiento en relación al proceso del precipitador comentados en la sección anterior.

Determinando la Eficiencia del Precipitador

La mejor forma de conocer el proceso de precipitación es estudiar la relación conocida como la Ecuación de Deutsch-Anderson. Esta ecuación se usa para determinar la eficiencia de recolección bajo condiciones ideales. La forma más simple de esta ecuación es:

$$\eta = 1 - e^{-\omega (A/Q)}$$

Donde: η = eficiencia de recolección del precipitador

A = área de placa de recolección efectiva del precipitador, m^2 (ft^2)

Q = razón de flujo de gas a través del precipitador, m^3/s (ft^3/seg)

e = base del logaritmo natural = 2.718

ω = velocidad de migración, cm/s (ft/seg)

Esta ecuación se ha usado por muchos años para calcular la eficiencia de recolección teórica en el diseño de un precipitador. Desafortunadamente, aunque la ecuación es válida, no considera tres variables significativas en el proceso y es difícil de entender. Primero, ignora la reintroducción del polvo que pueda ocurrir durante el proceso de sacudido. Segundo, asume que el tamaño de las partículas y su velocidad de migración son uniformes para todo el flujo de gas. Esto no es cierto; las partículas mayores generalmente tienen una mayor velocidad de migración que las más pequeñas. Tercero, asume que el flujo de gas es uniforme a lo largo del precipitador y que no hay fuga de partículas por las tolvas en vez de por las cámaras del precipitador, evitando ser recolectadas por no estar sujetas al campo eléctrico.

Ecuación de Deutsch-Anderson Modificada

Como hay varias deducciones incorrectas en la ecuación anterior, ésta se reemplaza por la ecuación modificada de Deutsch-Anderson.

La razón de eficiencia del precipitador " ω " es una cantidad que estima qué tan bien será recolectada la masa de polvo que entra el precipitador. En una técnica de diseño, ω^K se sustituye en la ecuación de Deutsch-Anderson en lugar de la velocidad de migración ω . Esta variable ω^K se calcula con la experiencia de campo y no por teoría; los valores de ω^K se determinan generalmente usando bancos de datos de instalaciones de precipitadores en industrias similares o de plantas de estudio piloto. En este contexto, ω^K no representa la velocidad de migración, sino un parámetro semi-empírico que se puede usar para determinar el área total de recolección necesaria para lograr la eficiencia de recolección especificada (White 1982).

Usando la ecuación de Deutsch-Anderson de esta forma puede ser útil al tratar de determinar el área adicional de recolección que se necesita para modificar un precipitador existente para cumplir con regulaciones más exigentes o mejorar el funcionamiento de la unidad. Sin embargo, es importante recordar que el área de recolección no es el único parámetro que afecta el funcionamiento del precipitador. La resistividad, distribución del flujo de gas, velocidad del gas y seccionalización eléctrica juegan un papel importante en determinar la eficiencia del precipitador.

Entendiendo las Ecuaciones de Deutsch-Anderson

Para los operadores de precipitadores, es muy probable que estas ecuaciones tengan muy poco valor en sus operaciones diarias. Sin embargo, es importante entender su implicación. La ecuación de Deutsch simplificada, en efecto, reduce la eficiencia de recolección del precipitador en relación directa a dos funciones mostradas aquí:

Ecuación de Deutsch Simplificada

La Eficiencia del Precipitador es Directamente Proporcional a:

- La velocidad del polvo hacia las placas de recolección
- El área relativa de las placas de recolección

Consideremos algunos ejemplos sencillos para comprender esto mejor. Si consideramos el área relativa de las placas de recolección del precipitador, encontramos que esta función se refiere generalmente como SCA del precipitador. SCA es un término que indica área de recolección específica.

Área de Recolección Específica

El área de recolección específica (SCA) se define como la relación del área superficial de recolección a la razón del flujo de gas en el colector. La importancia de este término es que representa la relación A/Q en la ecuación de Deutsch-Anderson.

$$SCA = \frac{\text{superficie total de recolección pies}^2}{\text{razón actual de flujo } 1000 \text{ pies}^3/\text{min.}}$$



Expresado en unidades métricas,

$$SCA = \frac{\text{superficie total de recolección en m}^2}{1000 \text{ m}^3/\text{hr}}$$

Expresado en unidades inglesas:

$$SCA = \frac{\text{superficie total de recolección en pies}^2}{1000 \text{ pies}^3/\text{min}}$$

Por ejemplo, si el área total de la superficie de recolección de un precipitador es 600,000 pies² y la razón del flujo de gas a través del mismo son 1,000,000 pies³/min (acfm), la SCA es 600 pies³ por 1000 acfm.

$$SCA = \frac{600\,000 \text{ pies}^2}{1000 (1000 \text{ acfm})}$$

$$= \frac{600 \text{ pies}^2}{1000 \text{ acfm}}$$

Como se puede ver en las ecuaciones anteriores, el área específica de recolección se calcula dividiendo el área superficial de los electrodos de recolección del precipitador entre el volumen de gas que pasa a través del precipitador. Por lo tanto, el número total de placas (tamaño) y volumen total del gas tienen un efecto directo en la eficiencia del precipitador.

El sentido común nos indicaría que si el precipitador fuera del doble de su tamaño, la eficiencia aumentaría porque el SCA aumentaría. Sin embargo, para resolver problemas en la eficiencia de recolección, es extremadamente costoso aumentar el área de placas en el precipitador. Esto implicaría añadir campos de recolección o aumentar la altura del precipitador para tener más área.

El otro aspecto de SCA está relacionado con el volumen de gas que pasa a través del precipitador. Se puede ver que si se reduce el volumen de gas (como está en el divisor) se aumentará el área relativa (SCA). Esto a su vez aumentará la eficiencia

del precipitador. Por supuesto, reducir el volumen de gas disminuye la producción lo que implica que esta solución es también muy costosa.

Esto nos lleva a examinar más de cerca la velocidad de las partículas de polvo hacia la placa de recolección. Esto se refiere generalmente como velocidad de migración del precipitador. Es quizá el factor más importante debido a que se afecta directamente por cambios en el proceso (aumentos o decrementos), y es el factor que se puede aumentar con mantenimiento o modificando el diseño del precipitador.

Por ejemplo, si los controles de voltaje existentes se instalaron en los años 1970s y son de diseño de reactor de núcleo saturable, un cambio simple a controles automáticos de voltaje en base de microprocesador brindarán un buen aumento en la velocidad de migración, y en efecto, aumentarán la eficiencia de recolección del precipitador. Lo mismo se puede decir al reemplazar las placas de recolección que se hayan doblado al paso de los años por placas nuevas y quizá cambiar los electrodos por nuevos estilos que mantengan los espacios eléctricos óptimos. Esto mejorará la velocidad de migración. En ambos ejemplos el tamaño relativo del precipitador no cambia, pero sí la velocidad de migración del polvo.

Velocidad de Migración

Cuando la partícula se ha cargado, emigra hacia los electrodos de recolección a tierra. Qué tan rápido se mueven las partículas al electrodo de recolección se denota por el símbolo ω , en las ecuaciones anteriores, se llama velocidad de migración o de arrastre. El parámetro de la velocidad de migración representa la capacidad de recolección de la partícula dentro de los confines del precipitador. La velocidad de migración se expresa:

$$\text{Donde: } \omega = \frac{E_o E_p a}{2 p h}$$

a = radio de la partícula

E_o = fuerza del campo en que se cargan las partículas
(representado por el voltaje pico), V/m (V/pie)

E_p = fuerza del campo en que las partículas se recolectan
(normalmente el campo cercano a las placas), V/m
(V/ft)

h = viscosidad del gas, Pa. s (cp)

p = 3.14

Como se puede ver, la velocidad de migración depende de la fuerza del voltaje en ambos campos el de carga y el de recolección. Por lo tanto, como ya se ha comentado, el precipitador debe usar el máximo voltaje de campo eléctrico para una máxima eficiencia de recolección. La velocidad de migración también depende del tamaño de las partículas ya que las partículas mayores se recolectan más fácilmente que las pequeñas.

Operación del Precipitador Sin Carga de Polvo

La eficiencia de recolección de un precipitador está directamente relacionada a la potencia total en todos los campos del precipitador. En general, a niveles más altos de potencia de operación que cada campo pueda lograr, mejor será la eficiencia de ese campo.

Mucha gente cree que el precipitador no puede funcionar (en este caso, lograr niveles de potencia) a menos que el aire esté cargado de polvo. Esta pregunta se puede resolver fácilmente al energizar cualquier campo del precipitador en aire. Es

Tabla 4.1 - Resultados de Carga de Aire

Voltaje del precip. (KV)	Corriente del precip. (mA)
0	0
1	0
5	0
10	0
15	0
16.5	1
24	100
28	200
30.6	300
33.5	400
34.0	500
35.2	600
36.3	700
36.8	750

* Resultados actuales dependen del tamaño del T/R, tipo de electrodo de alto voltaje, y espacio eléctrico.

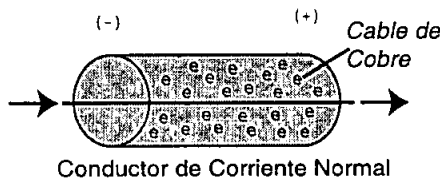
decir, cuando el proceso no está en operación, y que las temperaturas se han estabilizado a condiciones ambientales. Aún más, no se aísla el precipitador sino que se permite el paso del aire. Es importante tener aire en movimiento para obtener buenas lecturas de "carga de aire". Cuando el precipitador se energizó, se obtuvieron los resultados* de la Tabla 4.1.

Las lecturas en mA son sinónimo de la corriente actual que fluye en el precipitador. La corriente que fluye en el circuito es equivalente al número de electrones que se mueven a través de un cierto punto en ese circuito.

Conductor Pobre



Muy Buen Conductor



Conductor Moderado

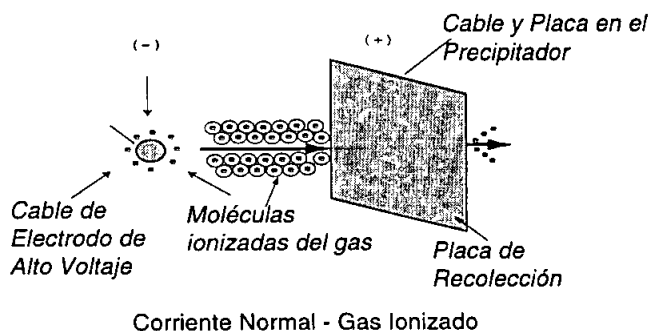


Figura 4.8 Acarreo de Corriente

Para que la corriente fluya en un precipitador, los electrones necesitan viajar desde los cables hacia las placas de recolección en el precipitador. Esto significa que el aire en el precipitador debe volverse un conductor. Es fácil comparar varios conductores, ver Figura 4.8 y notar que un aislante es un mal conductor, un pedazo de cable de cobre es un excelente conductor, y un precipitador energizado está en un término medio. La carga de aire demuestra que la corriente no empieza a fluir en el precipitador (en este caso) hasta que se aplica un voltaje de 16.5 kV. Este voltaje se conoce como el voltaje inicial de corona.

Con aumentos moderados en voltaje, se obtienen aumentos correspondientes en la corriente. Si la alineación es correcta entre los

cables y placas del precipitador, entonces la carga de aire debe lograr la corriente primaria o secundaria de placa del T/R que se está energizando. En nuestro ejemplo, se alcanzó primero la corriente secundaria (750 mA).

Por lo tanto, para obtener la corona de descarga en el precipitador, las partículas de polvo no son indispensables. Sin embargo, la concentración de las partículas tiene un efecto dramático en los niveles de potencia del precipitador, como se estudiará en la siguiente sección. El término "espacio de carga" se usa para indicar el campo del precipitador que está recolectando un número considerable de partículas finas o una concentración mayor de partículas grandes. En nuestro ejemplo, examinaremos este último, ya que es una ocurrencia común en las aplicaciones de cemento.

Tabla No. 4.2 - Efecto de las Partículas en el Espacio de Carga

Unidad	Amps	Volts	mA	KV	kW	Chispas/min
Kiln No. 1-1	123	337	664	50.1	27	0
Kiln No. 1-2	142	247	758	36.2	23	0
Kiln No. 2-1	9	232	39	57.5	1	20
Kiln No. 2-2	16	324	71	52.0	2	14
Kiln No. 2-3	115	465	940	48.0	38	3
Kiln No. 2-4	120	346	924	35.1	28	0

Espacio de Carga - Altas Concentraciones de Polvo

Como se analizó en la sección de carga de aire, como no hay partículas (polvo) en el espacio entre los electrodos, no puede haber espacio de carga. Sin embargo, con la influencia de una gran concentración de partículas grandes, se puede ver el efecto que tienen en los precipitadores - en este ejemplo de dos hornos de cemento de proceso húmedo. El horno No. 1 tiene un colector mecánico ciclón en serie con un precipitador, mientras que el horno No. 2 no lo tiene. Los controles automáticos de voltaje de estos dos precipitadores operaron de la manera mostrada en la Tabla 4.2.

Como el horno No. 2 no tiene un colector mecánico precediéndolo, la carga de polvo (concentración) es significativamente mayor que la del horno No. 1. Las lecturas del

control de voltaje muestran el efecto del espacio de carga. El espacio de carga se verifica por los altos voltajes, pero más acertadamente, por muy bajas corrientes. Es la ausencia de corriente lo que puede ser significativo.

Cuando se considera cuál parámetro es el más importante, voltaje (kV) o corriente (mA) del precipitador, generalmente la gente dirá kV. Esto es parcialmente correcto, pero no en este caso.

El voltaje del precipitador es responsable de empujar las partículas hacia las placas. La corriente es responsable de mantenerlas allí. Así que aunque el campo 1 del horno No. 2, tiene mucha fuerza de empuje, (57.5), no tiene fuerza de agarre. La mayoría del polvo se reintroduce hacia el siguiente campo.

Otro punto importante es observar que el chispeo en el precipitador está directamente relacionado a los niveles de voltaje del precipitador. Por eso los campos de entrada tendrán chispeo (debido al alto kV) mientras que los campos de salida a veces no lo tienen.

Si uno vé el flujo de corriente del T/R a los electrodos de alto voltaje a través del gas sucio, hacia la placa de recolección y de regreso al T/R (a través de la tierra) como se muestra en la Figura 4.9, el efecto de la movilidad de los iones es más aparente.

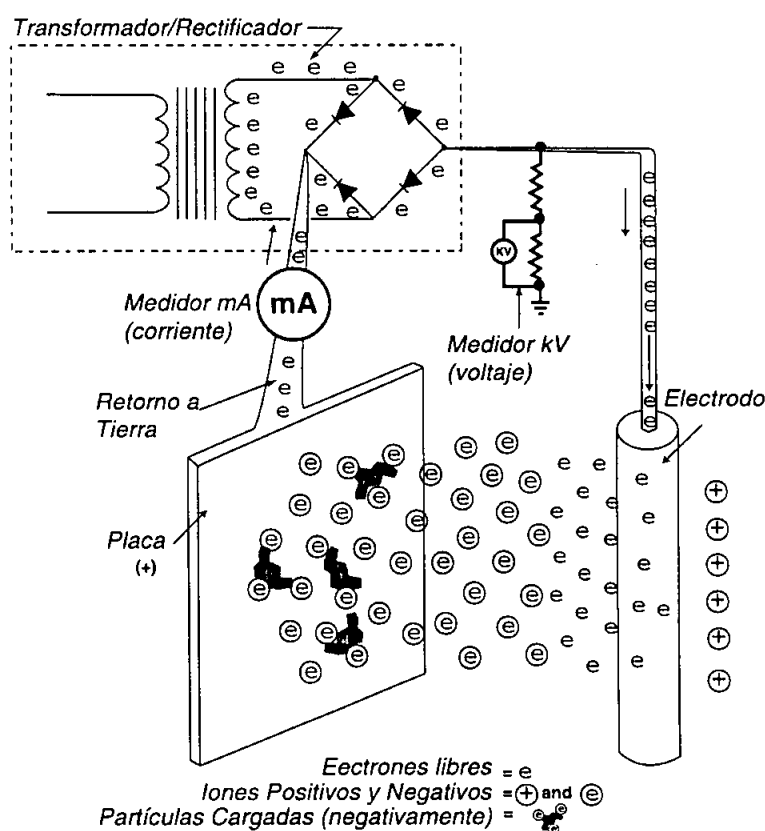


Figura 4.9 - Flujo de Corriente y Movilidad de Iones

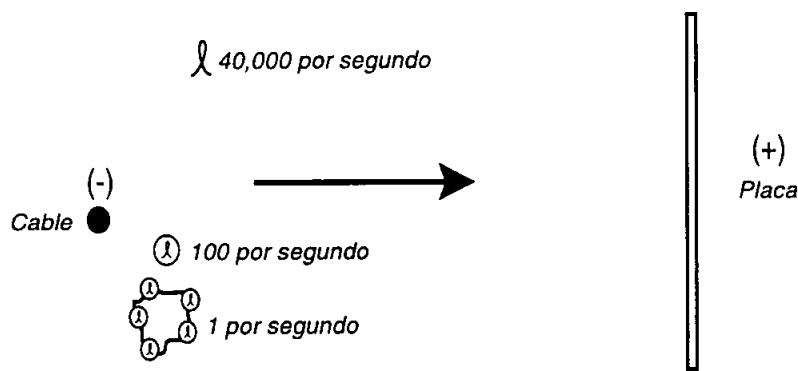


Figura 4.10 - Velocidad Relativa de Acarreo

La carga de aire demostró que en aire sin polvo, los electrones libres acarrean los iones negativos. Éstos se mueven rápidamente y buscan huecos, y el medidor MA los cuenta durante la carga de aire.

Al introducir polvo en el precipitador, la movilidad de los iones cambia dramáticamente. Las partículas cargadas, que se mueven lentamente establecen "el espacio de carga de partículas" en el espacio entre los electrodos. La Figura 4.10 da una mejor idea de su velocidad relativa. Como se mostró en la Figura 4.2, en el campo de entrada la mayoría del polvo se recolecta a bajas velocidades y los iones negativos y electrones libres no pasan, por lo que no se registran en el medidor mA. Por eso el precipitador tiene baja corriente en el campo de entrada.

Los efectos del espacio de carga pueden ser positivos o negativos. En el lado positivo, se crean altos voltajes aumentando los "campos eléctricos". El campo eléctrico es la fuerza que empuja las partículas de polvo, acelerándolas hacia las placas de recolección. A mayor aceleración se mejora la eficiencia. Por eso, en el ejemplo de la Figura 4.2, la eficiencia de recolección en el campo de entrada es mayor que en el de salida.

Sin embargo, en el ejemplo de la Tabla 4.2, el horno No. 2 opera con bajos niveles de corriente. Por lo tanto, el espacio de carga mejora el campo de recolección de partículas (altos voltajes), pero también contribuye a suprimir la corriente de corona. La corriente de corona afecta directamente la carga de partículas. Mientras más alta es la carga de partículas, menor será la reintroducción del polvo. Si se suprime la corona, se aumenta la reintroducción de partículas. Este era el caso del horno No. 2 en la Tabla Para mejorar la eficiencia de recolección en esa planta, se instalaron

electrodos de descarga con púas en el primer y segundo campo del horno No. 2. Estos producen menores voltajes, pero aumentan la corriente en el campo de entrada. La corriente adicional de corona ayuda a mejorar la eficiencia del precipitador.

Las altas concentraciones de polvo, no siempre son negativas. En el ejemplo siguiente, un precipitador mostró una mejora considerable en su eficiencia de recolección cuando la carga de polvo aumentó casi 20 veces! Este precipitador de 5 campos colecta polvo del molino de crudo y del escape del precalentador.

La carga de polvo con el molino en operación es aproximadamente de 220 granos por acfm, con una opacidad típica de operación del 10 al 15%. Cuando el molino está fuera de línea, ya sea en demanda o por razones inesperadas, la carga del precipitador se reduce considerablemente, hasta 15 granos por acfm. Sin embargo, la opacidad de salida aumenta del 30 al 40%. ¿Cómo puede un cambio tan considerable en la carga del precipitador, resultar en un decremento tan grande en su eficiencia y opacidad? La respuesta está en la resistividad del polvo.

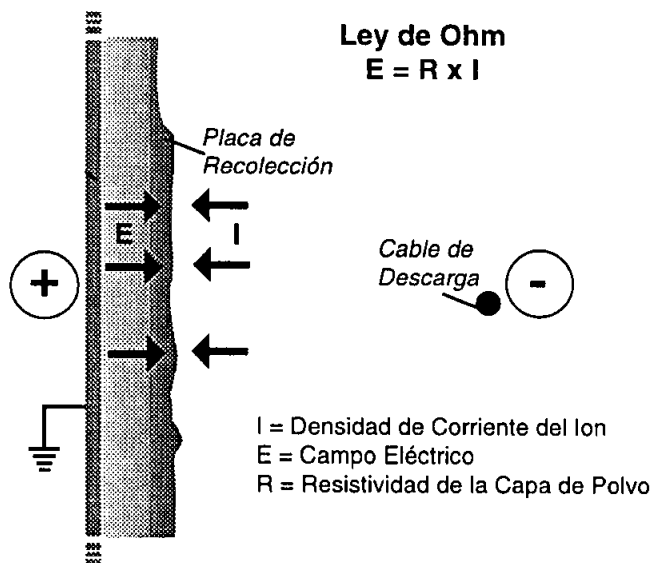


Figura 4.11
 Relación de la Ley de Ohm en la Capa de Polvo

Resistividad y Corona Inversa

La resistividad es la resistencia eléctrica de un centímetro cúbico de polvo expresado en unidades de ohm/cm. La Figura 4.11 muestra la relación de la Ley de Ohm presente en la capa de polvo en la placa de recolección del precipitador. La corriente de corona fluye hacia tierra del electrodo de alto voltaje después de pasar por la acumulación de polvo



depositada en la placa de recolección. Esta placa a tierra tiene 0 potencial de voltaje, mientras que la superficie de la capa de polvo (más cercana al cable) aún a través de 1/4" puede crear una caída de voltaje. La caída de voltaje es proporcional a la magnitud de la corriente de corona y a la resistencia eléctrica de la capa de polvo.

La caída máxima de voltaje que una capa de polvo puede soportar sin rompimiento se define por la fuerza dieléctrica del polvo, y es típicamente de 15 a 20 kV. Si se excede este valor, ocurre el rompimiento de la capa de polvo, resultando en la formación de corona invertida o la propagación de chispas a través del espacio entre electrodos.

Corona Invertida

La corona invertida se puede explicar mejor como el tener dos fuentes de generación de corona en el precipitador. Ya sabemos que los cables de alto voltaje generan corona. El nuevo emisor viene de la capa de polvo, creando un rompimiento eléctrico en la placa.

Este rompimiento genera iones positivos, cancelando la carga negativa producida por los cables de alto voltaje. Las partículas de polvo literalmente se "neutralizan" con cargas opuestas. Esto resulta en una pérdida considerable en la eficiencia de recolección asociada con la alta resistividad del polvo.

Este rompimiento eléctrico de la capa de polvo puede ocurrir de dos maneras. Primero, si el flujo de corriente en el circuito es excesivamente alto (poco común) o si la resistividad de la capa de polvo es alta (más común). Cuando ocurre el rompimiento debido a la alta resistividad del polvo, la corriente de corona, voltaje y potencia de entrada útil del precipitador están limitadas por la resistividad de la capa de polvo. Esto causa que la eficiencia de recolección del precipitador sea mucho menor que si el polvo tuviera menor resistividad.

El contenido de humedad en el flujo de gas también afecta la resistividad de las partículas. Aumentando el contenido de humedad en el flujo de gas se disminuye la resistividad. Esto se puede lograr al usar un rociador de agua en el ducto de entrada al precipitador. Para ajustes de temperatura y humedad, las condiciones del gas se

deben mantener por encima del punto de condensación para evitar problemas de corrosión.

La falta de SO_3 en el flujo de gas es más común en los procesos donde hay problemas de alta resistividad. La mayoría del sulfuro contenido en el carbón quemado por combustión se convierte en SO_2 . Sin embargo, aproximadamente el 1% del sulfuro se convierte en SO_3 . La cantidad de SO_3 en el gas normalmente aumenta al aumentar el contenido de sulfuro del carbón. La resistividad de las partículas disminuye cuando el contenido de sulfuro aumenta.

El uso de carbón de bajo sulfuro para operaciones de calderas ha causado problemas en la resistividad de la ceniza en las operaciones del precipitador. Para este tipo de polvo, la resistividad se puede bajar a ser menor al nivel crítico de inyección de 10 a 30 ppm SO_3 en el flujo de gas. El SO_3 se inyecta en el ducto que precede el precipitador. Se han usado también otros agentes condicionantes como ácido sulfúrico, amoníaco, cloruro sódico y sosa para reducir la resistividad del polvo. (White 1974)

Otros dos métodos usados para manejar la resistividad de las partículas incluyen aumentar el área de la superficie de recolección y aumentar la temperatura del gas. Aumentando el área de recolección del precipitador aumentará el costo del precipitador y puede no ser un método muy deseable para reducir los problemas de resistividad.

Baja Resistividad

Las partículas con baja resistividad son difíciles de recolectar porque se cargan fácilmente y pierden su carga al llegar al electrodo de recolección. Las partículas se cargan con la carga del electrodo de recolección, reintroduciéndose en el flujo de gas. Ejemplos de polvo de baja resistividad son carbón negro y ceniza de carbón no quemado.

Si estas partículas conductivas son gruesas, se pueden recolectar antes del precipitador usando un aparato como un ciclón. Las placas difusoras instaladas en las placas de recolección ayudan a disminuir la reintroducción.

Lde amonia líquida (NH_3) al flujo de gas como un agente condicionante se empezó a usar en años recientes. En teoría la amonia reacciona con H_2SO_4 contenido en el flujo de gas para formar un compuesto de sulfato amónico que aumenta la acumulación del polvo. El vapor de amonia se inyecta al ducto que va al precipitador en concentraciones de 15 a 40 ppm de volumen. La inyección de NH_3 ha mejorado la resistividad y acumulación de la ceniza en calderas de carbón con bajas temperaturas del gas.

Efecto de la Resistividad

La Figura 4.2 muestra el efecto que la resistividad del polvo tiene en la eficiencia de un precipitador. SCA es el término que equivale aproximadamente al tamaño relativo del precipitador. Como se puede ver, cuando la resistividad es mayor al 10^{10} hasta 10^{12} ohm-cm, se necesita triplicar el tamaño del precipitador para obtener la misma eficiencia.

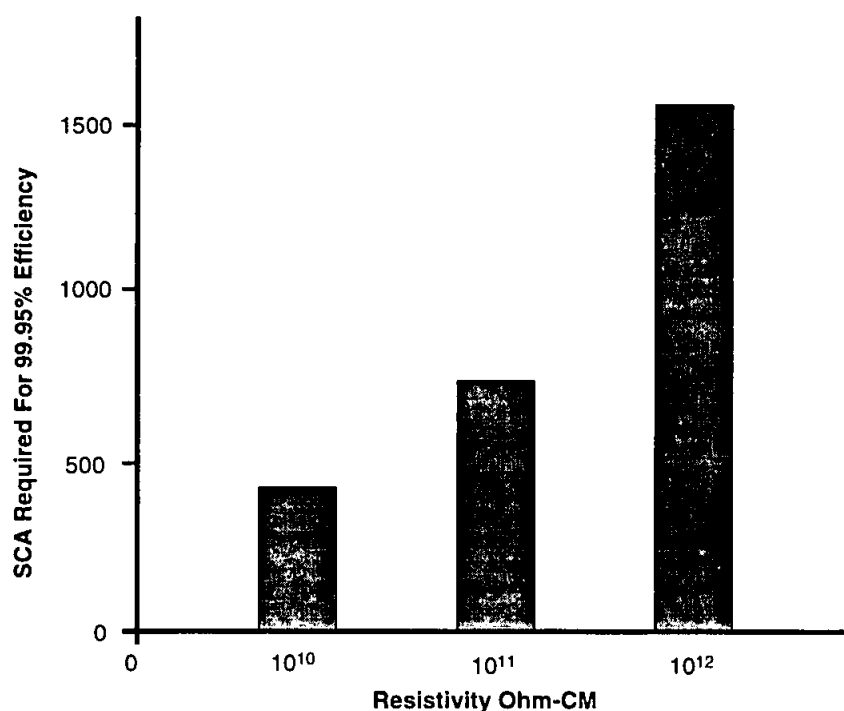


Figura 4.12 - Factor de Resistividad del Polvo

Observando las mediciones del control de voltaje para un precipitador con problemas de alta resistividad se ven niveles bajos de corriente en cada campo del precipitador. A menudo es difícil distinguir si hay un problema de resistividad en los campos de entrada, pero al examinar la

Tabla 4.12, se nota que los campos de salida de los precipitadores de ambos hornos muestran niveles de corriente muy altos en este sistema de proceso húmedo.

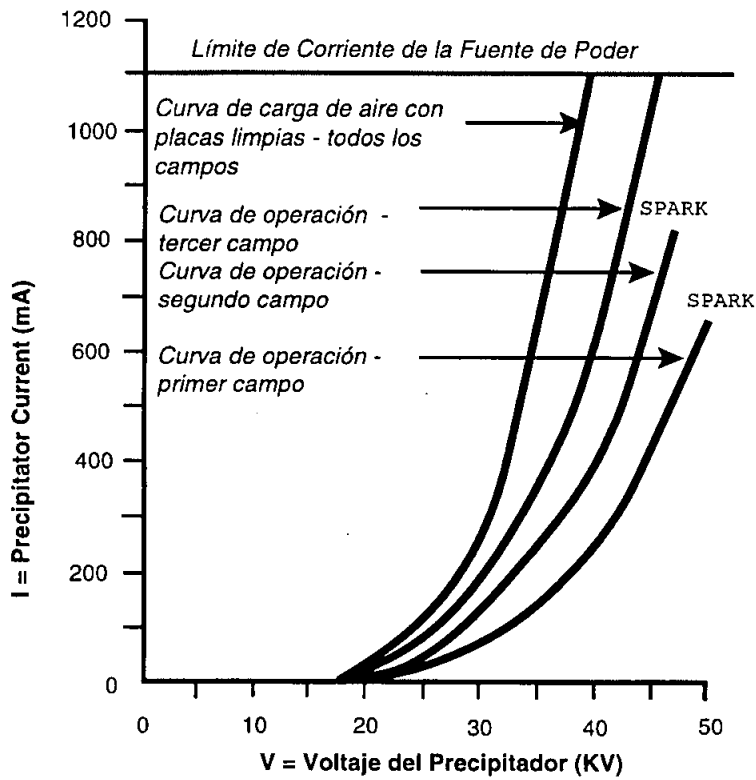


Figura 4.13
Curvas Normales de Voltaje-
Corriente del Precipitador (V-I)

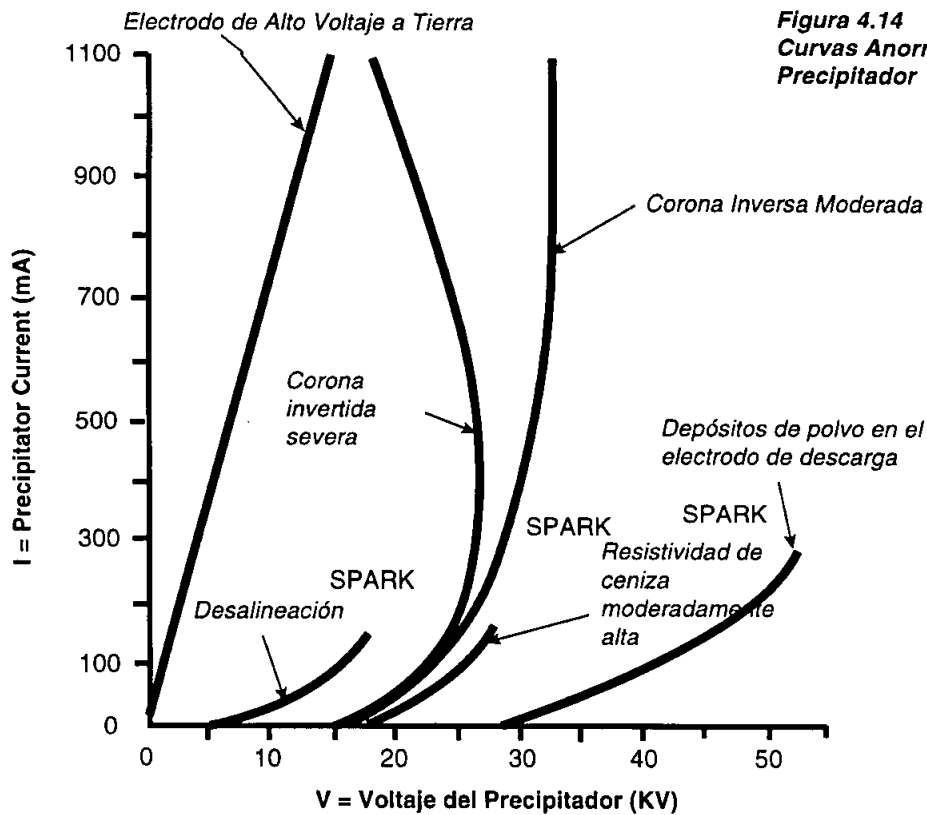


Figura 4.14
Curvas Anormales de V-I del
Precipitador

Si hubiera un problema de resistividad (que es raro en aplicaciones de proceso húmedo), sería evidente en las bajas corrientes de los campos de salida. Hay que considerar que los niveles bajos de corriente también se pueden causar por la mala alineación de los electrodos en el precipitador. Por lo tanto, cómo distinguir entre bajos niveles de corriente causados por resistividad del polvo o problemas de alineación. Esto nos lleva a las curvas de voltaje-corriente.

Curvas de Voltaje-Corriente

La curva de voltaje-corriente para encontrar soluciones a problemas de un precipitador es como un estetoscopio para un cardiólogo. Cuando el precipitador está operando no se puede ver lo que sucede adentro que pueda afectar su funcionamiento. Sin embargo, examinando con cuidado la relación entre los niveles de voltaje y corriente en el precipitador en operación, se puede predecir lo que está afectando su funcionamiento.

La curva de V-I se genera haciendo los controles de voltaje cero y lentamente aumentándolo los niveles de potencia, anotando los kilovoltios y miliamperes en intervalos convenientes (de 50mA o 100mA) hasta que haya una chispa. Graficando los kilovoltios en el eje "X" y los miliamperes en el "Y" y uniendo los puntos obtenidos se obtiene la curva. Algunas curvas típicas para un horno de cemento de proceso seco se muestran en la Figura 4.13. Note que el voltaje y corriente que corresponden a cada campo refleja la relación de corriente mostrada en la Figura 4.2.

Cuando hay problemas con la operación del precipitador, Figura 4.14 puede ayudar a encontrar soluciones. Por ejemplo, la alta resistividad del polvo con bajos niveles de corriente en los campos de salida se puede parecer a la curva "moderadamente alta" en resistividad de la Figura 4.14. Esta curva muestra el voltaje de inicio de corona como normal (18kV), pero el nivel de corriente del campo de salida sólo aumenta a un nivel muy bajo en comparación con la curva de la Figura 4.13.

Esto difiere de un mal alineamiento de los electrodos (espacio de cable a placa) en el precipitador. El mal alineamiento muestra un voltaje de inicio de corona muy bajo (el espacio eléctrico es menor), y ocurren chispas.

Estas curvas también se pueden utilizar para mostrar que hay acumulación de polvo excesiva en los electrodos de alto voltaje. Esta acumulación excesiva es aparente como si se aumentara el diámetro del electrodo de alto voltaje. La acumulación de polvo en los cables tiene el mismo efecto de disminuir el voltaje de inicio de corona de su rango normal de 15 a 20kV hasta 25 a 35kV. El problema es que no se puede obtener una corriente tan alta como si los cables estuvieran limpios. Recuerde que un precipitador necesita niveles de corriente y voltaje altos.

Razón de Orientación

La razón de orientación es la razón de la longitud efectiva a la altura efectiva de la superficie de recolección. Ésta se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$AR = \frac{\text{longitud efectiva, m (pies)}}{\text{altura efectiva, m (pies)}}$$

Al calcular la razón de orientación, la longitud efectiva de la superficie de recolección se obtiene sumando la longitud de una placa en cada campo consecutivo. Por ejemplo, si una placa mide 10 pies de largo y hay 4 campos en serie en el precipitador, la longitud efectiva de la superficie de recolección sería de 40 pies. Si la altura de una placa de recolección es de 30 pies la razón de orientación para este ejemplo es 1.33.

$$\begin{aligned} AR &= \frac{10 + 10 + 10 + 10 \text{ pies}}{30 \text{ pies}} \\ &= \frac{40 \text{ pies}}{30 \text{ pies}} \\ &= 1.33 \end{aligned}$$

La importancia de esta relación está en la pérdida de sacudido. Cuando las partículas se sacuden, el polvo recolectado se acarrea a través del precipitador por el flujo de gas. Si la longitud total efectiva de las placas en el precipitador es pequeña comparada a su altura efectiva, algo del polvo se reintroducirá y será acarreado fuera del precipitador antes de llegar a las tolvas. El tiempo que se requiere para

que el polvo caiga de la parte superior de una placa de 9.1m (30 pies) son varios segundos. Esto es suficiente para que una gran cantidad de polvo recolectado sea acarreado hacia afuera del precipitador, a menos que la longitud efectiva de las placas sea de 10.7 a 12.2m (35 a 40 pies) mínimo. La relación de orientación de un precipitador varía de 0.5 a 2.0. Sin embargo, para precipitadores muy eficientes (con eficiencias de recolección >99%), esta relación de diseño debe ser mayor a 1.0, generalmente de 1.5.

Distribución del Flujo de Gas

El flujo de gas a través del precipitador debe ser lento y estar distribuido uniformemente. Las velocidades del gas en el ducto de entrada al precipitador generalmente son de 6 a 24 m/s (20 a 80 pies/seg). La velocidad del gas que entra al precipitador debe reducirse para una recolección adecuada de partículas. Esto se logra usando una expansión del pleno de entrada.

El pleno de entrada contiene placas difusoras perforadas con orificios distribuidos de manera uniforme para distribuir el flujo de gas a través del precipitador. Las velocidades típicas del gas en la cámara del precipitador varían de 0.75 a 1.80 m/s (2.5 a 6 pies/s). Con relaciones de orientación de 1.06, la velocidad óptima del gas es generalmente entre 1.37 y 1.8 m/s (3.5 y 4.5 pies/seg).

Como resumen, se enumeran a continuación factores específicos que influyen el funcionamiento del precipitador:

Electrodos de Recolección y de Descarga

- Perfil de los electrodos de recolección y de descarga
- Espacio entre los electrodos de recolección y de descarga
- Alineamiento del sistema de electrodos
- Precisión en la fabricación del sistema de electrodos
- Mecanismo para desalojo de polvo de los electrodos de recolección y de descarga

Eléctrico

- Fuerza del campo
- Corriente de corona
- Tamaño del campo del precipitador energizado por cada T/R y AVC
- Diseño del sistema eléctrico de alto voltaje
- Factor de forma y conducción fraccional
- Acoplamiento correcto de los componentes eléctricos

Flujo de Gas

- Densidad
- Composición
- Temperatura
- Contenido de humedad (viscosidad)
- Velocidad, y distribución de la velocidad en el campo

Polvo y Partículas de Humo

- Tamaño y forma
- Composición
- Concentración
- Resistividad eléctrica
- Gravedad específica
- Propiedades superficiales
- Fuerzas de aglomeración entre partículas



CAPÍTULO 5

Mantenimiento y Soluciones

MANTENIMIENTO Y SOLUCIONES

Es cierto que el precipitador puede presentar muchos problemas en términos de mantener una funcionalidad óptima, pero no es imposible lograr eficiencias de recolección altas y confiabilidad a largo plazo. Para lograr estos niveles es crítico tener un programa de mantenimiento eficaz así como una comprensión básica del proceso de precipitación para que los cambios en los datos de operación se puedan interpretar correctamente.

Problemas Típicos del Precipitador

La clasificación general de los problemas del precipitador electrostático se pueden dividir en dos áreas, problemas inesperados a corto plazo y problemas generales a largo plazo que bajan la eficiencia de recolección a través del tiempo. Como es de esperarse, es más fácil resolver los problemas inesperados a corto plazo que ocurren de vez en cuando. Los más comunes son:

- Cables rotos
- Problemas de distribución de gas
- Alineación interna/mecánica de cable a placa
- Corrosión
- Aisladores rotos
- Problemas de la fuente de poder
- Sacudidores

Se deben considerar ambos tipos de problemas para lograr una operación eficiente y sin problemas en el precipitador. Esta sección se enfoca en problemas a corto plazo porque son los más comunes.

Cables Rotos

Probablemente el problema más frecuente es el de cables rotos. Cuando se rompe un cable, las fuerzas dinámicas dentro del precipitador pueden causar que se mueva haciendo cortos en el campo. Mientras que el precipitador puede operar con un campo apagado, es obvio que no es recomendable. Los cables se rompen por varias razones, algunas de ellas no se relacionan con el cable en sí mismo.

La falla de electrodos de descarga rotos se puede clasificar como consecuencia de problemas de erosión eléctrica, fatiga mecánica y corrosión. Mientras que el rompimiento del electrodo de descarga o cable es muy común, también es un problema muy fácil de corregir si se identifica el problema pronto.

La erosión eléctrica de los electrodos de descarga se caracteriza por el desgaste de los electrodos de descarga al punto que no pueden soportar la presión aplicada y se rompen. Esta falla en particular es la más común, y se puede resolver mejorando el control automático de voltaje y evaluando el T/R y el reactor limitador de corriente.

Además de que los controles eléctricos y el sistema de energización contribuyen a este problema, la estabilidad dinámica de los electrodos de descarga también puede contribuir a la erosión eléctrica. Para verificar esta situación, revise los pesos de tensionado y los marcos inferiores de estabilización.

La pérdida gradual de funcionalidad es un problema más difícil de corregir. Se deben revisar y corregir muchas áreas. Estas áreas típicamente incluyen distribución del gas, sacudido, aisladores y problemas de la fuente eléctrica.

Distribución del Gas

Es muy importante verificar la distribución del gas para la buena funcionalidad. Para usar adecuadamente el área efectiva de las placas en un precipitador, es necesario distribuir los gases de manera uniforme en el área transversal disponible. La velocidad del gas a través del precipitador está diseñada generalmente en un rango de 1 a 1.3 m/seg. Esta velocidad es lo suficientemente baja que permite suficiente tiempo de tratamiento y evita las pérdidas de reintroducción durante períodos de sacudido. El problema que existe con las velocidades en este rango es que es difícil que haya una buena distribución con sólo una placa perforada o placa difusora. La razón es que no hay suficiente presión dinámica para hacer cambios grandes en la distribución en el punto de la placa perforada. El objetivo deseado para la distribución del flujo es tener el 85% de las mediciones de la presión de velocidad en el frente del precipitador dentro del $\pm 15\%$ de la media, y no más del 1% que sea $\pm 40\%$ de la media.

Como ejemplo, un precipitador con una velocidad nominal de gas de 1m/s tendría una velocidad de operación máxima de 1.8 m/s, si el 90% del flujo se dirigiera a la mitad superior de la zona de recolección. Este tipo de problema no es tan raro y afecta considerablemente el funcionamiento del precipitador. Esto se debe a que las altas velocidades no sólo aumentan la reintroducción del polvo durante el sacudido, sino que ocasionan la supresión del espacio de carga en esa zona y bajan el área específica eficiente de recolección del precipitador.

Además de la distribución del flujo, el control del flujo para minimizar la fuga de la zona de tratamiento es también importante para lograr una alta eficiencia. Muchos precipitadores carecen de placas difusoras adecuadas. Los gases del proceso se pueden escapar de la zona de tratamiento a través de áreas entre la última placa de un campo y la estructura del precipitador. Es común que los gases se escapen de la zona de tratamiento pasando por debajo de las placas de recolección al área en la parte superior de las tolvas. Este tipo de fuga de gases ya que el polvo recolectado y sacudido que va a caer a las tolvas es reintegrado en el flujo de gas.

Problemas Mecánicos Internos/Alineación de los Cables-Placas

Suponiendo que el flujo de gas esté distribuido adecuadamente a través de toda el área transversal del precipitador, la siguiente área en importancia a evaluar al tratar de determinar qué factores están causando pérdidas en el funcionamiento del precipitador es su condición mecánica interna. Los espacios adecuados y eficiencia del sacudido son áreas de mucha importancia. Es fundamental para el proceso electrostático maximizar la entrada de potencia eléctrica. Si los espacios eléctricos se ven comprometidos debido a la mala alineación de los electrodos o a placas de recolección pandeadas, el voltaje y fuerza de campo máximos se verán limitados.

La tolerancia máxima del espacio entre los electrodos de descarga y de recolección debe ser $\pm 1/2$ " de la ideal. Por ejemplo, si el espacio entre placas es de 10", la distancia ideal sería la mitad o sea 5". No se recomienda aceptar espacios menores a 4.5". Si el espacio es menor a 4.5", las opciones serán remover los electrodos de descarga que tienen este espacio o reconstruir el precipitador. Mientras que es práctica bastante común el quitar los electrodos de descarga, no se recomienda

eliminar más del 5% de los electrodos o el quitar varios electrodos en un pasaje de gas específico.

La estabilización adecuada de los electrodos de descarga es también muy importante. Este factor parece crear más problemas con los precipitadores de cables con pesos que con los de diseño de marco rígido. Las razones para este problema son que los pesos de tensionado no son del tamaño adecuado para mantener la estabilización durante las cargas dinámicas y los estabilizadores de los marcos inferiores no limitan el movimiento de éste durante las fuerzas de operación.

Otro punto importante es la condición y efectividad del alto voltaje y el sistema de sacudido del electrodo de recolección.

Corrosión

Este es un problema a largo y corto plazo y puede ser crítico para el funcionamiento del precipitador (y seguridad). La corrosión generalmente es causada por fugas de aire ambiental al interior del precipitador, resultando en condensación de la humedad, ácidos u otros elementos corrosivos que se encuentren en el flujo de gas. No hay área dentro o sobre el precipitador que prácticamente sea inmune a la corrosión.

La corrosión se puede localizar y reparar fácilmente en placas, tolvas, estructura y otras áreas similares. La corrosión local generalmente es el resultado de mal aislantes (o falta de éstos). La mejor manera de prevenir la corrosión de este tipo es asegurarse que el precipitador esté aislado adecuadamente y que no haya fugas del exterior. La corrosión que aparece en los componentes estructurales, como barras de soporte, debe repararse lo antes posible.

Aisladores Rotos

Los aisladores generalmente se cuartean o rompen como resultado de la acumulación de polvo que ocasiona fugas eléctricas. Las fugas eléctricas son el resultado de la transferencia de una carga eléctrica siendo transferida del bus de alto voltaje a tierra a través del aislador. La mejor manera de prevenir este problema es instalar un sistema de purga de aire para mantener los aisladores calientes y libres

de polvo y humedad. Mientras que los calentadores mantienen los aisladores calientes, no ayudan a la eliminación del polvo.

Problemas de la Fuente Eléctrica

Puede ocurrir una variedad de problemas en el sistema eléctrico, la mayoría de los cuales son a corto plazo y se pueden corregir fácilmente. Estos problemas típicos incluyen:

- Valores inadecuados del control automático de voltaje - El AVC está diseñado para aplicar la máxima potencia permisible al precipitador, limitada sólo por la capacidad eléctrica del T/R, o la capacidad del precipitador de acuerdo al voltaje de chispa. Estos valores deben fijarse en uno de esos límites.
- Chispeo o arqueo excesivo - no está estrictamente relacionado con los componentes eléctricos y los valores fijos
- Controladores, CLRs, T/R u otros componentes eléctricos obsoletos
- Mala transferencia de energía (energía y potencia insuficiente)
- Componentes de tamaño inadecuado

La evaluación del sistema eléctrico es una parte esencial de cualquier procedimiento de soluciones. Una evaluación a conciencia del sistema de control de la línea principal de poder debe realizarse, sobre todo en precipitadores viejos. Considere mejorar los controles con tiristores modernos en vez de reactores de núcleo saturables. El funcionamiento del precipitador depende directamente de la cantidad de energía introducida al sistema. El mejorar los sistemas obsoletos puede mejorar la entrada de potencia al precipitador en un 25 a 35% con su correspondiente mejora en eficiencia.

Además de mejorar el control eléctrico y fuentes de poder, periódicamente tome curvas de voltaje-corriente bajo condiciones de operación. Evalúe los datos para ver la forma de la curva, el voltaje de inicio de corona y el voltaje pico de la curva. Al

evaluar y comparar las curvas de voltaje de modo periódico, cualquier desgaste que ocurra debido al tiempo se puede medir. Los cambios en la operación, programas de sacudido y valores de los controles se pueden modificar para minimizar problemas que se noten en las curvas de V-I.

Problemas del Sistema de Sacudido

Otra área de preocupación especialmente al considerar causas de problemas internos/mecánicos es el sistema de sacudido en los sistemas de las placas de recolección y de alto voltaje.

Se puede aprender mucho al observar el grosor de la capa de polvo en las placas de recolección y electrodos de descarga. La acumulación excesiva de polvo en los electrodos de descarga altera la generación del voltaje corriente características de los electrodos de descarga. El voltaje de inicio de corona de cualquier electrodo de descarga está directamente relacionado al radio de curvatura de ese electrodo. Por eso se diseñan los electrodos con diámetros muy pequeños y por eso los electrodos rígidos tienen picos que actúan como generadores de la corona de descarga. Si estos electrodos aumentan en su radio de curvatura debido a la acumulación de polvo, la habilidad de generar corona se ve comprometida al igual que el funcionamiento del precipitador. Las razones más comunes de la ineficiencia de los sacudidores son:

- Pérdida de energía a través del mecanismo de transmisión debido a conexiones flojas y fijación de las barras de sacudido en sus guías
- Ensamblajes de martillos de sacudido mal alineados y gastados
- Barras de sacudido gastadas y fatiga mecánica de la interfase de la barra de choque de la placa
- Mala aplicación del sacudido en términos de la cantidad de superficie de recolección o longitud del electrodo de descarga que debe limpiar un sacudidor

Todos estos problemas o fallas se pueden remediar fácilmente para restablecer un buen funcionamiento.

Resistividad y Tamaño

No se puede efectuar una evaluación completa del precipitador sin considerar las características del polvo en términos de su resistividad y sensibilidad de su resistividad a la temperatura y humedad. A menudo, cambios pequeños en humedad y temperatura ocasionan grandes cambios en la resistividad que pueden afectar la eficiencia del precipitador. Cuando se hagan pruebas de resistividad en el laboratorio, son precisas, y desde un punto de vista económico, son relativamente baratas considerando los beneficios que se obtienen. Además de verificar las características del polvo, es importante analizar el tamaño del precipitador.

Mantenimiento de Rutina

El mantener registros exactos y completos es la clave para un programa de mantenimiento efectivo. Grabar los resultados de las inspecciones y cualquier mantenimiento preventivo así como observar la eficiencia de recolección.

La frecuencia de inspección se debe determinar por un procedimiento de mantenimiento en la planta. Las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a horarios de inspección deben considerarse. Una lista de procedimientos de mantenimiento periódico para un precipitador típico se proporciona a continuación en la Tabla 5.1. Un programa de mantenimiento bien ejecutado puede evitar que el precipitador tanga fallas prematuras y ayuda a que la unidad se mantenga en regla con las normas de regulación de la contaminación ambiental.

Tabla 5.1 - Lista de Mantenimiento Preventivo para un Precipitador Típico

Diario

1. Registre las lecturas eléctricas
2. Verifique la operación de las tolvas y sistema de desalojo del polvo
3. Examine el sistema de ventilación del cuarto de control

Semanal

1. Verifique la operación de sacudidores y vibradores
2. Verifique y limpie el filtro de aire
3. Inspeccione el interior de los controles

Mensual

1. Verifique la operación del ventilador de presurización y termostato de la estructura superior
2. Verifique la operación de los calentadores de las tolvas
3. Verifique la operación del nivel de alarma de las tolvas
4. Verifique que no haya corrosión externa, vibración anormal, ruido, fugas y aislamiento suelto, puertas y juntas.

Trimestral

1. Revise y limpie los contactos de los interruptores de los sacudidores y vibradores
2. Revise la calibración del transmisor de mediciones

Semianual

1. Limpie y lubrique los goznes de las puertas de acceso
2. Limpie y lubrique las cubiertas de interlock
3. Limpie y lubrique las conexiones de prueba
4. Revise el exterior en busca de signos de deterioro, corrosión, vibración anormal, ruido y fugas de aire; revise el sello de las puertas
5. Revise los niveles de líquido y espacio de chispa del arrestor del T/R

Anual

1. Conduzca una inspección interna completa
2. Limpie la estructura superior o compartimiento de aisladores y todas las conexiones eléctricas
3. Revise y corrija el alineamiento incorrecto de placas y cables
4. Examine y limpie todos los contactos e inspeccione la firmeza de las conexiones eléctricas y tierra
5. Limpie e inspeccione los empaques de las conexiones
6. Revise y ajuste la operación del equipo de interruptores
7. Revise y apriete las conexiones del aislador de sacudido
8. Observe y anote las áreas que tienen corrosión

Ocasional

1. Registre los resultados de la carga de aire y de gas después de cada paro
2. Revise y limpie el interior de los controles durante cada paro de más de 72 horas
3. Limpie todas las abrazaderas durante paros de más de 5 días
4. inspeccione la condición de todos los aparatos a tierra durante cada paro de más de 72 horas



Principios Básicos de los Precipitadores Electrostáticos

5. Limpie todos los cortos y acumulación de polvo en las tolvas durante cada paro
6. Inspeccione y registre la cantidad y localización de depósitos residuales de polvo en los electrodos durante cada paro de 72 horas o más
7. Revise todas las alarmas, interlocks y otros aparatos de seguridad durante cada paro



CAPITULO 6

Guía de Instalación, Arranque y Paros

GUÍA DE INSTALACIÓN, ARRANQUE Y PAROS

Dependiendo de la selección del precipitador electrostático, la instalación y arranque pueden tardar algunos meses o uno o dos años. De cualquier modo, los procedimientos de instalación adecuados ahorrarán tiempo y dinero y ayudarán en la operación y mantenimiento futuros del precipitador.

Como todas las tolerancias de diseño son crítica para lograr un funcionamiento adecuado del precipitador (especialmente los que afectan la alineación de los electrodos de descarga y recolección), es imperativo conocer bien los procedimientos correctos de instalación.

Algunas características claves para re-evaluar durante la instalación son:

1. Fácil acceso a todas las áreas potenciales de mantenimiento - ventiladores, motores, tolvas, aparatos de descarga, compuertas, razón de flujo de gas, monitores de temperatura, aisladores, sacudidores, T/Rs, controles y electrodos de descarga y recolección.
2. Fácil acceso a todas las áreas de inspección y pruebas - puertos de pruebas de chimenea y monitores continuos de emisiones (monitores de opacidad).
3. Condiciones ambientales - el precipitador debe soportar las inclemencias del tiempo como lluvia o nieve.

Durante la instalación, se debe evaluar cuidadosamente el siguiente criterio.

1. Distribución de gas uniforme a través de toda la unidad

La ductería, placas de desviación y difusión y las placas perforadas afectan la distribución del gas. Estos medios generalmente se instalan en el campo. Si se instalan inadecuadamente, crean regiones de alto flujo de aire y bajan la eficiencia de recolección ocasionando la reintroducción del polvo recolectado, especialmente durante los ciclos de sacudido.

2. Sello completo del sistema del precipitador del punto de recolección a la salida de la chimenea

Las entradas de fugas de aire en bridas o puntos de acceso del colector añaden flujo

de aire para el proceso o propician el escape de gases del colector. Las fugas internas son muy dañinas, porque crean puntos fríos y pueden crear humedad o condensación ácida y posible corrosión. Si ésta es severa, puede hacer que la temperatura del proceso pase por el punto de condensación, haciendo que la humedad o ácidos se condensen en las paredes de la tolva y electrodos de descarga y de recolección. Además, las fugas y la condensación de la humedad causan que la ceniza se endurezca en la tolva dificultando su desalojo. La mejor manera de buscar fugas es inspeccionar las paredes desde el interior del sistema durante el día. La penetración de luz del exterior ayuda a localizar las áreas con problemas.

3. Instalación adecuada de cables de descarga y placas de recolección

Los electrodos de recolección se instalan generalmente primero, y los cables se posicionan en relación a éstos. Cada sección de electrodos se debe revisar para asegurarse que el nivel, tensado y alineación entre las placas y cables sea el correcto.

4. Instalación adecuada de los sacudidores

Los sacudidores de las placas de recolección y cables de descarga debe instalarse y alinearse de acuerdo a las especificaciones del fabricante. El sistema de transmisión del sacudidor debe revisarse para que no haya sacudidores atorados, sellos de gas y conexiones sólidas al yunque. Si se usan martillos y yunques, se debe revisar que los martillos peguen al yunque con precisión. Los vibradores y el sistema de transmisión instalados en los cables también se debe revisar en busca de los mismos problemas que se presentan en los sacudidores de las placas. La frecuencia e intensidad del sacudido se pueden optimizar cuando la unidad está en línea.

5. Aislamiento adecuado

La mayoría de los precipitadores usan algún tipo de aislamiento para mantener la temperatura del flujo de gas. Esto se hace para evitar que la humedad o ácidos presentes en el flujo se condensen en las tolvas, electrodos o superficies de los ductos. Debido a que muchos precipitadores se instalan en el campo, es importante revisar que las superficies y áreas de pérdida de calor potencial estén cubiertas.

6. Instalación y operación adecuada de las válvulas de desalojo de las tolvas

Es importante revisar la operación de los aparatos de descarga antes de ponerlos en



línea. Asegúrese que se muevan en la dirección adecuada para desalojar el polvo de la tolva. Si un transportador sin fin se mueve en sentido opuesto, puede apelmazar el polvo al grado de doblar el propio eje.

7. Ventiladores

Se debe verificar la rotación, alineamiento del drive y vibración de los ventiladores. Estos se deben montar fijamente a un componente de masa suficiente para eliminar la vibración excesiva.

Cada instalación del precipitador debe tener su propia lista que refleje las características de construcción de la unidad. La cuadrilla que haga la instalación debe preparar una lista de verificación antes de hacer la inspección final y arrancar el equipo. Una lista de verificación se sugiere a continuación.

Lista de Verificación

Placas de Recolección

1. No estén dobladas o pandeadas
2. Libre de rebaba y orillas salientes
3. Sistema de soporte equilibrado y nivelado
4. Barras espaciadoras y guías de las esquinas no se atorán
5. No hay acumulación excesiva
6. Placas difusoras bien colocadas y no están tapadas

Electrodos de Descarga

1. No hay cables rotos o colgando (aguados)
2. Los cables no están atorados en las guías ni el peso de suspensión en el gancho
3. Marcos rígidos equilibrados y nivelados
4. Electrodo rígidos nivelados y derechos
5. No hay acumulación excesiva ni tierras
6. Alineación dentro de las especificaciones de diseño

Tolvas

1. Eliminar andamios
2. Descarga y orificios de desalojo limpios

3. Nivel de detección sin obstruir
4. Puertas de acceso y de difusión cerradas
5. Calentadores, vibradores y alarmas en buen funcionamiento

Estructura Superior y Compartimientos de Aisladores

1. Aisladores y empaques limpios y secos sin huellas de carbón
2. Todas las cadenas a tierra con abrazaderas
3. Calentadores intactos; controles del sistema de aire, alarmas, compuertas y filtros en su lugar y operando correctamente
4. Rotación correcta del motor del ventilador
5. Todas las puertas de acceso cerradas

Sacudidores

1. Todos los martillos, barras y ejes en su lugar y no atorados
2. Guías y rodamientos intactos
3. Cableado de control y de campo terminado correctamente
4. Luces de indicación e instrumentación operando
5. Residuos desalojados del precipitador
6. Todo el personal fuera de la unidad
7. Todos los interlocks operando y con llave
 - a. No hay llaves rotas o perdidas
 - b. Cubiertas en todas las llaves

Transformador/Rectificador

1. Arrestor no cuarteado o quebrado
2. Nivel de líquido satisfactorio y limpio
3. Conexiones de alto voltaje bien hechas
4. Tierras en: precipitador, empaques de salida, ductos de bus, conductos, etc.

Controles Automáticos de Voltaje

1. Controles aterrizados
2. Fuente de poder y alarmas adecuadamente cableados
3. Llave del interlock en bloque de transferencia



Mediciones de Voltaje-Corriente con el Precipitador en Línea

Como se mencionó en capítulos anteriores, las curvas de V-I para un precipitador en línea se pueden usar para comparar los niveles de voltaje y corriente de operación a los niveles de carga de aire para ayudar a determinar si hay problemas.

La corriente y voltaje aumentan cuando las secciones de bus se energizan hasta que se alcanza el límite del T/R o hay chispeo. Se obtienen altas mediciones de voltaje cuando las placas de recolección están sucias debido a la caída de voltaje a través de la capa de polvo. Una medición de alto voltaje con baja corriente ocurre cuando el polvo tiene alta resistividad o si los electrodos de descarga no funcionan. Esto se puede ver en la curva donde el voltaje alcanza el límite de chispeo antes de llegar al límite de los controles. Los campos de entrada generalmente tienen altos voltajes para los mismos niveles de corriente que los campos de salida. Esto es debido a las altas concentraciones de polvo en los campos de entrada que suprimen la corriente. Las curvas de salida tienden a mostrar corrientes más altas para los mismos niveles de voltaje que los campos de entrada.

Arranque

El arranque de un precipitador electrostático es generalmente una rutina de operación. Involucra calentar un número de componentes tales como aisladores de soporte y tolvas. Si es posible, el precipitador no se debe encender hasta que el proceso alcance condiciones estables.

Esto es muy importante para los precipitadores de hornos de cemento que usan carbón como combustible. Cuando el horno se calienta, los gases se pasan en el flujo de escape. Los precipitadores electrostáticos no se deben activar hasta que el combustible ya no tenga estos gases. Los arcos internos del precipitador pueden causar fuego o explosiones.

Cuando se usan precipitadores en calderas, éstas se deben arrancar con gas o combustible de aceite #2. Aceite pesado (#6) no es bueno para el arranque ya que las emisiones de partículas pueden cubrir las placas de recolección y son difíciles de quitar. Si se usa un precipitador en una caldera de carbón, no se debe arrancar hasta que se verifique la combustión de la caldera. Esto ayudará a evitar la acumulación de gases en la unidad ocasionando explosiones. Un procedimiento de arranque típico para el precipitador de una caldera se da a continuación.

Procedimiento de Arranque Típico

Operación Normal

Arranque (revisión anti-operacional—dos horas antes de la carga del gas):

1. Puntos de mantenimiento/inspección verificados
2. Eliminar residuos del precipitador
3. Llaves de seguridad deben funcionar y todas las llaves estar contadas
4. No debe haber personal en el precipitador
5. Poner llave al precipitador y poner llaves en los bloques de transferencia

Inicio (mínimo 1 hora antes de la carga del gas):

6. Revisar tolvas
 - a. Sistema indicador de nivel operando
 - b. Sistema de manejo de ceniza operando y en secuencia; dejar en modo de operación
 - c. Calentadores de las tolvas en operación
7. Revisar el sistema de aire de la estructura superior
 - a. Revisar funcionamiento del ventilador y dejar trabajando
 - b. Calentadores de empaques deben operar bien
8. Revisar sacudidores
 - a. Encender, verificar secuencia, asegúrese que todos los sacudidores operan bien
 - b. Ajuste el tiempo de ciclos e intensidad, usando la instrumentación instalada - deje los sacudidores en operación

Carga del gas

9. Después que el gas a una temperatura mayor a 200° F (95°C) ha entrado al precipitador durante 2 horas:



Principios Básicos de los Precipitadores Electrostáticos

- a. Energice los T/R
- b. Revise la operación normal de los controles automáticos de voltaje; anote las lecturas
- c. Revise las alarmas local y remota que funcionen bien
- d. Revise la operación del sistema de desalojo de ceniza
- e. Desconecte la electricidad de los calentadores de empaques (calentadores de tolvas, opcional)

Arranque en frío(cuando no es posible tener el gas a 200° F durante 2 horas antes de energizar los controles, proceda como se indica a continuación):

1. Siga los pasos anteriores 1-9; aumente la intensidad de sacudido 50%
2. Energice T/R, empezando con el campo de entrada, ajuste los controles de voltaje a un punto justo abajo del valor de chispa
3. Para mantener el nivel de opacidad, energice los campos siguientes al aumentar la carga, manteniendo un voltaje por abajo de chispeo normal (menos de 10 chispas/minuto)
4. Realice el paso 10d
5. Después que el gas a 200° F ha entrado al precipitador durante 2 horas, siga los pasos 1-b, y e; establezca el sacudido normal

Paros

Cuando la fuente se apaga temporalmente, el sistema del precipitador debe desenergizarse para ahorrar energía. Los paros del precipitador generalmente se hacen siguiendo el orden inverso de los pasos de arranque, iniciando con el apagar los campos para mantener los niveles de opacidad de la chimenea. Hacer trabajar los sacudidores por un corto tiempo después que el precipitador se ha apagado para remover el polvo acumulado en las placas de recolección y electrodos de descarga. Todas las tolvas se deben vaciar completamente antes de volver a colocar la unidad en línea. Un procedimiento típico de paro y emergencias se muestra a continuación.

Procedimiento Típico de Paro y Emergencia

Procedimiento típico de paro

1. Cuando la carga de la caldera cae y la cantidad total de ceniza disminuye:
 - a. De-energice el campo del precipitador, empezando con el campo de entrada

para mantener los límites de opacidad

- b. De-energice el campo de salida cuando todo el flujo del combustible haya cesado y el flujo sea menor al 30%
- c. Deje los sacudidores, sistema de desalojo de ceniza, sistema de aire y calentadores de las tolvas en operación
- d. Cuatro horas después de apagar la caldera, de-energice el sistema de aire y los calentadores de las tolvas; asegure el sistema de desalojo de ceniza
- e. Ocho horas después de apagar la caldera, de-energice los sacudidores

Nota: Durante paros normales es conveniente revisar la operación de las alarmas

Paro de Emergencia

1. De-energice todos los T/R
2. Siga los pasos c, d, y e mostrados arriba (paro normal)

Capacitación del Operador

Antes que se inicie el precipitador, el ingeniero de planta debe programar sesiones de capacitación para todos los empleados de la planta que operan y mantienen la unidad. En estas sesiones de capacitación, se deben considerar varios temas incluyendo el diseño del sistema, sus controles, límites críticos del equipo, funciones de sus componentes, parámetros de operación a monitorear, buenas prácticas de operación, mantenimiento preventivo, procedimientos de arranque y paros, procedimientos de paros de emergencia y otras consideraciones de seguridad.

Las sesiones de capacitación del fabricante deben considerarse para los supervisores, operadores y personal de mantenimiento. La capacitación puede proporcionarla el vendedor o una compañía de consultoría especialista en precipitadores. El tiempo de capacitación varía dependiendo en lo complejo del sistema del diseño.

Seguridad

Un precipitador puede ser un equipo muy peligroso - especialmente respecto a su operación eléctrica. El personal que opera y mantiene el precipitador debe estar bien capacitado en todos aspectos de seguridad para evitar accidentes. Se debe asignar la responsabilidad a una persona de la planta para verificar la seguridad de los



estándares y equipos y proporcionar capacitación de seguridad al personal que trabaja en la unidad.

Cableado y Controles

1. Antes del arranque, asegúrese que el cableado del campo entre los controles y aparatos como T/R, sacudidores y controles de sacudido sea correcto y esté indicado claramente y bien aterrizado.
2. Nunca toque partes internas del sistema de control que estén expuestas. La operación de los controles del T/R implica el uso de muy altos voltajes. Aunque se han incorporado todas las medidas de control en este equipo, siempre tome precauciones responsables durante su operación.
3. Nunca use sus dedos o desarmadores de metal para ajustar aparatos de control no aislados.

Acceso

1. Asegúrese que el personal esté fuera del precipitador, controles, etc., antes de energizarlo. Nunca rompa los espacios de seguridad establecidos por la planta.
2. Nunca pase el sistema de seguridad. Destruye cualquier llave extra. Siempre mantenga las tapas de las llaves en su lugar. Use polvo de grafito para lubricar el sistema; nunca use aceite o grasa.
3. Use cadenas de aterrizaje al entrar al precipitador, T/R o ductos de bus. El precipitador puede mantener una carga estática de hasta 15 kV después de desenergizarse. La única tierra segura es la que se puede ver.
4. Nunca abra la puerta de la tolva a menos que el nivel de polvo esté por debajo de la puerta. No confíe en el nivel de alarma. Verifique desde el interior del precipitador. El polvo caliente puede fluir como agua y quemar o matar a la persona que se encuentre cerca de la puerta. Use ropa protectora.
5. Asegúrese de pisar con seguridad antes de entrar al precipitador. Elimine todas obstrucciones que puedan causar tropiezos. Acerque (sin tocar) la parte de atrás de la palma de la mano para probar si el metal está muy caliente.
6. Evite inhalar ozono. El ozono se crea cuando se energizan los electrodos de descarga. Use una máscara de aire al entrar al precipitador. No use respiradores de cartuchos o filtros.
7. Nunca meta barras de metal por las tolvas para soltar el polvo. Mantenga

señales de seguridad y cuidado en lugares visibles. Las señales limpias y brillantes son más visibles que las deterioradas.

Fuego/Explosión

1. En caso de fallas en la caldera que puedan permitir que los gases o acarreo de carbón entre al precipitador, inmediatamente apague todos los T/R. Estos gases pueden incendiarse por las chispas en el precipitador ocasionando fuego o explosiones y dañando las partes internas del precipitador.
2. Si hay altos niveles de carbón en las superficies de recolección o en las tolvas, *no abra las puertas de acceso del precipitador hasta que éste se enfríe por debajo de 52° C (125° F)*. La entrada de aire frío al polvo caliente puede causar una combustión espontánea.
3. Si se sospecha que hay fuego en la tolva, vacíe la tolva afectada. Si no se puede vaciar la tolva inmediatamente, apague los T/Rs de la tolva hasta que la pueda vaciar. No use otro método para vaciar la tolva. Nunca use agua para controlar este tipo de fuego. Estos agentes sueltan hidrógeno, aumentando la posibilidad de una explosión.



Apéndice

APÉNDICE

Boletín Técnico - "How To Determine The Correct Discharge Electrode..."

Boletín Técnico - "PrecipTech's Superior...RDE-1"

Boletín Técnico - "Should I Consider RDEs?"

Boletín Técnico - "PrecipTech's ESP-3 Collection Electrode..."

Boletín Técnico - "Top Hat Seals Solve Air In-Leakage and Corrosion..."

Boletín Técnico - "...Why Customers Find The SQ-300 Superior"

Boletín Técnico - "The Importance and Value of SCRs"

Boletín Técnico - "DB-50 Voltage Divider..."

Boletín Técnico - "On-Line Monitoring and Troubleshooting..."

Boletín Técnico - "PRC-100...."