



Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire

Nombre de la Tecnología: Precipitador Electrostático Seco (PES) - Tipo Placa-Alambre

Tipo de Tecnología: Dispositivo de Control - Captura/Disposición

Contaminantes Aplicables: Materia Particulada (PM), que incluye materia particulada menor o igual a 10 micras (μm) de diámetro aerodinámico (PM_{10}), materia particulada menor o igual a 2,5 micras de diámetro aerodinámico ($\text{PM}_{2,5}$), y contaminantes peligrosos del aire (CPA) que existen en forma particulada, tales como la mayoría de los metales (el mercurio es la excepción notable, ya que una porción importante de las emisiones se encuentran en forma de vapor elemental).

Límites de Emisiones Alcanzables/Reducciones:

Las eficiencias típicas de equipos nuevos varían entre 99 y 99.9%. Los equipos existentes más antiguos tienen un rango de eficiencia de operación de 90 a 99.9%. Aunque son varios los factores que determinan la eficiencia de recolección de los PES, el más importante es el tamaño del PES. El tamaño determina el tiempo de tratamiento pues entre más tiempo permanezca una partícula en el PES, es más probable que ésta sea atrapada. Al maximizar la fuerza del campo eléctrico, se maximiza la eficiencia de recolección del PES (STAPPA/ALAPCO, 1996). La eficiencia de recolección también se ve afectada en cierto grado por la resistividad del polvo, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas) y por la distribución del tamaño de las partículas. Las eficiencias de recolección de PM, PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ para PES operando efectivamente en varios tipos de aplicaciones se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencias de Recolección Acumulativas de los PES para PM, PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ (EPA, 1998; 1997).

Aplicación	Eficiencia de Recolección (%)		
	PM Total (EPA, 1997)	PM_{10} (EPA, 1998)	$\text{PM}_{2,5}$ (EPA, 1998)
Calderas de Carbón			
Fondo seco (bituminoso)	99,2	97,7	96
Esparcidor (bituminoso)	99,2	99,4	97,7
Producción Primaria de Cobre			
Tostador de fogones múltiples	99	99	99,1
Horno de fundición de reverbero	99	97,1	97,4
Producción de Hierro y Acero			
Horno de fogones abiertos	99,2	99,2	99,2

Tipo de Fuente Aplicable: Punto.

Aplicaciones Industriales Típicas:

Aproximadamente el 80% de todos los PE en los EE. UU. se utilizan en la industria de servicios eléctricos públicos. Los PE también son utilizados en las industrias papeleras y de pulpa de madera (7%), cementera y de otros minerales (3%), y de metales no ferrosos (1%) (EPA, 1998). Las aplicaciones comunes de los PES del tipo placa-alambre se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Aplicaciones Industriales Típicas de los PES tipo Placa-Alambre (EPA, 1998).

Aplicación	Source Category Code -SCC (Código de Categoría de la Fuente)	¿Existen otros tipos de PE también usados típicamente para esta aplicación?
Calderas, Termoeléctricas (Carbón, Petróleo)	1-01-002...004	No
Calderas Industriales (Carbón, Petróleo, Madera, Residuos Líquidos)	1-02-001...005 1-02-009,-013	No
Calderas Comerciales/Institucionales (Carbón, Petróleo, Madera)	1-03-001...005 1-03-009	No
Manufactura Química	Específico al sitio	Sí
Procesamiento de Metales No Ferrosos (Primario y Secundario):		
Cobre	3-03-005 3-04-002	Sí
Plomo	3-03-010 3-04-004	Sí
Zinc	3-03-030 3-04-008	Sí
Aluminio	3-03-000...002 3-04-001	Sí
Producción de Otros Metales	3-03-011...014 3-04-005...006 3-04-010...022	Sí
Procesamiento de Metales Ferrosos:		
Producción de Aleaciones Ferrosas	3-03-006...007	No
Producción de Hierro y Acero	3-03-008...009	Sí
Fundiciones de Hierro Gris	1188	No
Fundiciones de Acero	3-04-007,-009	Sí
Refinerías de Petróleo e Industrias Relacionadas	3-06-001...999	No
Productos Minerales:		
Manufactura de Cemento	3-05-006...007	No
Extracción y Procesamiento de Piedra	3-05-020	Sí
Otros	3-05-003...999	Sí
Madera, Pulpa y Papel	3-07-001	Sí
Incineración (Residuos Municipales)	5-01-001	Sí

Características de las Emisiones:

- a. **Flujo de Aire:** Los flujos de aire típicos para los PE tipo placa-alambre varían de 100 a 500 metros cúbicos estándares por segundo (sm^3/s) (200.000 a 1.000.000 pies cúbicos estándares por minuto ($scfm$)). La mayoría de los PE del tipo con placas más pequeñas ($50 sm^3/s$ a $100 sm^3/s$, o 100.000 a 200.000 $scfm$) usan placas planas en vez de alambres para los electrodos de alto voltaje (AWMA, 1992).
- b. **Temperatura:** Los PES tipo placa-alambre pueden operar a temperaturas muy altas, hasta los $700^{\circ}C$ ($1300^{\circ}F$) (AWMA, 1992). La temperatura de operación del gas y la composición química del polvo son factores claves que influyen la resistividad del polvo y deben ser consideradas cuidadosamente en el diseño de un PE.
- c. **Carga de Contaminante:** Las concentraciones típicas a la entrada de un PE tipo placa-alambre son de 2 a 110 grams (g)/ sm^3 (1 a 50 granos (gr)/ scf). Es común darle un pretratamiento a la corriente residual, normalmente con un colector mecánico o ciclón, para bajar la carga del contaminante a este rango. Los flujos altamente tóxicos con concentraciones menores de $1 g/m^3$ ($0,5 gr/scf$), también son controlados en ocasiones por PES (Bradburn, 1999; Boyer, 1999; Brown, 1999).
- d. **Otras Consideraciones:** En general, los PES operan más eficientemente con resistividades de polvo entre 5×10^3 y 2×10^{10} ohm-cm. En general, las partículas más difíciles de recolectar son aquellas con diámetros aerodinámicos entre 0,1 y 1,0 mm. Las partículas entre 0,2 y 0,4 μm por lo general presentan la mayor penetración. Esto es probablemente el resultado de la región de transición entre las cargas de campo y de difusión (EPA, 1998).

Requisitos de Pretratamiento de la Emisión:

Cuando gran parte del cargamento de contaminantes consiste en partículas relativamente grandes se pueden utilizar recolectores mecánicos, tales como los ciclones o las torres lavadoras, para reducir la carga sobre el PE, especialmente a concentraciones altas de entrada. A veces se utiliza equipo para acondicionamiento de gases para mejorar el funcionamiento de los PE al cambiar la resistividad del polvo como parte integral del diseño original, pero con mayor frecuencia se utiliza para modernizar los PE existentes. El equipo inyecta un agente dentro de la corriente gaseosa anterior al PES. Por lo general, el agente se mezcla con las partículas y altera su resistividad para promover una velocidad de migración más alta, y por lo tanto, una mayor eficiencia de recolección. Los agentes acondicionadores utilizados incluyen SO_3 , H_2SO_4 , compuestos de sodio, amoníaco, y agua; el agente acondicionador de mayor uso es el SO_3 (AWMA, 1992).

Información de Costos:

A continuación se presentan los rangos de costo (expresados en dólares del 2002) para los PE tipo placa-alambre de diseño convencional bajo condiciones típicas de operación, desarrollados utilizando los formatos de la U.S. EPA para estimación de costos (EPA, 1996). Los costos pueden ser sustancialmente más altos que los rangos expuestos para los contaminantes que requieran un nivel extremadamente alto de control, o que requieran que los PE sean construídos con materiales especiales tales como el acero inoxidable o el titanio. En general, las unidades más pequeñas que controlen corrientes residuales de baja concentración no serán tan eficientes en costo como lo será una unidad más grande que purifique una emisión con un contenido alto en contaminantes.

- a. **Costo de Capital:** \$21,000 a \$70,000 por sm^3/s (\$10 a \$33 por *scfm*)
- b. **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$6,400 a \$74,000 por sm^3/s (\$3 a \$35 por *scfm*), anualmente.
- c. **Costo Anualizado:** \$9,100 a \$81,000 por sm^3/s (\$4 a \$38 por *scfm*), anualmente
- d. **Eficiencia en el Costo:** \$38 a \$260 por tonelada métrica (\$35 a \$236 por tonelada corta)

Teoría de Operación:

Un PE es un dispositivo para el control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para movilizar las partículas encauzadas dentro de una corriente de emisión hacia las superficies de recolección. Una carga eléctrica es impartida a las partículas encauzadas cuando pasan a través de una corona, una región donde fluyen los iones en fase gaseosa. Los electrodos ubicados en el centro del plano del flujo se mantienen a un alto voltaje y generan un campo eléctrico que fuerza a las partículas hacia las paredes recolectoras. En los PES, los recolectores son golpeados, o “martillados”, por varios métodos mecánicos para desprender las partículas, que se desliza descendiendo hacia una tolva en donde son recolectado. La tolva es evacuada periódicamente a manera que ésta se llena. El polvo se retira a través de una válvula hacia un sistema que administra el polvo, tal como una cinta neumática, y después se desecha de una manera apropiada.

En un PE de tipo tubo-alambre, el gas emitido fluye horizontalmente y paralelo a las placas verticales de metal en hoja. El espacio entre las placas varía típicamente entre 19 y 38 cm (9 y 18 pulgadas) (AWMA, 1992). Los electrodos de alto voltaje son alambres largos con pesas en su extremo inferior, y están colgados entre las placas. Algunos diseños posteriores utilizan electrodos rígidos (tubos huecos de aproximadamente 25 a 40 mm de diámetro) en vez de alambre (Cooper y Alley, 1994). Dentro de cada sendero de flujo, el flujo de gas debe pasar cada alambre en secuencia a medida que fluye a través de la unidad. Las superficies de flujo entre las placas son llamados ductos. Las alturas de los ductos varían típicamente entre los 6 y 14 m (20 a 25 pies) (EPA, 1998).

Las fuentes de energía para el PE convierten el voltaje AC industrial (220 a 480 voltios) a voltaje DC pulsante en el rango de 20.000 a 100.000 voltios según sea necesario. El voltaje aplicado a los electrodos causa que el gas entre los electrodos se descomponga eléctricamente, un acto conocido como una “corona.” Se suele impartir una polaridad negativa a los electrodos porque una corona negativa tolera un voltaje más alto antes de producir chispa que una corona positiva. Los iones generados en la corona siguen las líneas del campo eléctrico desde el electrodo hasta las superficies colectoras. Por lo tanto, cada combinación de tubo y electrodo establece una zona de carga a través de la cual deben pasar las partículas. Puesto que las partículas mayores (>10 μm de diámetro) absorben varias veces más iones que las menores (>1 μm de diámetro), las fuerzas eléctricas son mucho más fuertes en las partículas mayores (EPA, 1996).

Ciertos tipos de pérdidas afectan la eficiencia de control. El martilleo que desprende la capa acumulada también proyecta algunas de las partículas (típicamente el 12% en el caso de la ceniza flotante de carbón) hacia la corriente de gas. Estas partículas reencauzadas son a su vez procesadas de nuevo por secciones posteriores, pero las partículas reencauzadas en la última sección del PE no tienen la oportunidad de ser recapturadas y de esa manera escapan de la unidad. Debido a los espacios libres necesarios para los componentes internos no electrificados en la parte superior del PE, parte del gas pudiera fluir alrededor de las zonas de carga. A esto se le llama “fuga furtiva” e impone un límite superior sobre la eficiencia. Los deflectores antifuga son colocados para forzar el flujo de la fuga a mezclarse con la corriente principal del gas para su recolección en secciones posteriores (EPA, 1998).

Otro factor principal en el funcionamiento es la resistividad del material recolectado. Debido a que las partículas forman una capa continua sobre la tubería del PE, toda la corriente iónica debe atravesar la capa para alcanzar el suelo. Esta corriente crea un campo eléctrico en la capa, y puede volverse lo

suficientemente grande como para causar una avería eléctrica local. Cuando esto ocurre, iones nuevos de la polaridad opuesta son inyectados dentro del espacio entre el tubo y el alambre, en donde reducen la carga sobre las partículas y pueden causar chispas. A ésta condición de avería se le llama “corona reversa”. La corona reversa prevalece cuando la resistividad de la capa es alta, por lo general sobre los 2×10^{11} ohm-cm. Por encima de este nivel, la capacidad de recolección de la unidad se reduce considerablemente porque la corona reversa severa causa dificultades para cargar las partículas. Las resistividades bajas también causarían problemas. A resistividades menores de 10^8 ohm-cm, las partículas se retienen sobre la superficie colectora de una manera tan suelta que tanto el reencauzamiento general, como aquél asociado con la limpieza de los recolectores, se vuelven mucho más severos. Por lo tanto, se debe tener cuidado al medir o al estimar la resistividad porque es afectada fuertemente por variables tales como la temperatura, humedad, la composición del gas, la composición de las partículas, y las características de la superficie (AWMA, 1992).

El tamaño del precipitador se relaciona a varios parámetros del diseño. Uno de los parámetros principales es el *specific collection area* (SCA, área específica de recolección), que se define como la relación de la superficie de los electrodos colectores al flujo del gas. Las superficies mayores de recolección conducen a mejores eficiencias de remoción. Las superficies de recolección están normalmente en el rango de 40 a 160 m^2 por sm^3/s de flujo del gas ($200\text{-}800 \text{ ft}^2/1000 \text{ scfm}$), con valores típicos de 80 (400) (AWMA, 1992).

Ventajas:

Los PES del tipo tubo-alambre y otros PE en general, debido a que actúan únicamente sobre el particulado por eliminar, y sólo impiden el flujo de la corriente de gas de manera mínima, tienen bajas de presión muy pequeñas (típicamente menores de 13 mm (0,5 pulgadas) de columna de agua). Como resultado, los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos. Son capaces de alcanzar eficiencias muy altas, aún con partículas muy pequeñas. Pueden ser diseñados para un rango amplio de temperaturas de gases, y pueden manejar temperaturas altas, hasta los 700°C (1300°F). La recolección y eliminación del residuo en seco permite una manipulación fácil. Los costos de operación son relativamente bajos. Los PE son capaces de operar bajo presiones altas (hasta 1.030 kPa (150 psi)) o condiciones de vacío. Las velocidades de flujo relativamente grandes se pueden manejar de manera efectiva. (AWMA, 1992).

Desventajas:

Los PE tienen costos de capital generalmente altos. Los electrodos de descarga fabricados de alambre (aproximadamente $2,5 \text{ mm}$ ($0,01 \text{ in.}$) de diámetro), requieren altos niveles de mantenimiento. Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación ácida. Además, los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar - la parte media del alambre puede acercarse al tubo, causando más chispas y desgaste. Los diseños de PE más nuevos tienden a utilizar los electrodos rígidos (Cooper y Alley, 1994; Flynn, 1999).

En general los PE no son muy apropiados para uso en procesos que sean demasiado variables, debido a que son muy sensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas, y el cargamento de partículas). Los PE también son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que los PES deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas necesarias para la recolección eficiente de PM (Cooper y Alley, 1994). Ciertas partículas son difíciles de recolectar debido a sus características de resistividad demasiado altas o bajas. Puede existir un peligro de explosión al tratar gases combustibles y/o recolectar partículas combustibles. Se requiere personal de mantenimiento relativamente sofisticado, así como de precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje. Los PES no son recomendables para la eliminación de partículas pegajosas o húmedas. Se produce ozono por el electrodo de carga negativa durante la ionización del gas (AWMA, 1992).

Otras Consideraciones:

Los polvos con resistividades muy altas (mayores de 10^{10} ohm-cm) tampoco son idóneos para la recolección en PE. Estas partículas no se cargan fácilmente, y por lo tanto no se recolectan fácilmente. Además, las partículas de alta resistividad generan capas de ceniza con pendientes de voltaje muy altas sobre los electrodos colectores. Las averías eléctricas en estas capas de ceniza conducen a la inyección de iones cargados positivamente dentro del espacio entre los electrodos de descarga y de colección (corona reversa), reduciendo de este modo la carga en las partículas en este espacio y disminuyendo la eficiencia de recolección. La ceniza flotante proveniente de la combustión del carbón bajo en azufre tiene típicamente una resistividad alta, y por ello es difícil de recolectar (ICAC, 1999).

Referencias:

- AWMA, 1992. *Air & Waste Management Association, Air Pollution Engineering Manual*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Boyer, 1999. James Boyer, *Beaumont Environmental Systems*, (724) 941-1743, personal communication with Eric Albright, January 18, 1999.
- Bradburn, 1999. Keith Bradburn, *ABB Environmental Systems*, (800) 346-8944, personal communication with Eric Albright, January 18, 1999.
- Brown, 1999. Bob Brown, *Environmental Elements Corp.*, (410) 368-6894, personal communication with Eric Albright, January 18, 1999.
- Cooper & Alley, 1994. C. D. Cooper and F. C. Alley, *Air Pollution Control: A Design Approach*, Second Edition, Waveland Press, Inc. IL.
- EPA, 1996. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "OAQPS Control Cost Manual," Fifth Edition, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC. February.
- EPA, 1997. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I, Fifth Edition, Research Triangle Park, NC., October.
- EPA, 1998. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter," EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC., October.
- ICAC, 1999. *Institute of Clean Air Companies internet web page www.icac.com, Control Technology Information - Electrostatic Precipitator*, page last updated January 11, 1999.
- STAPPA/ALAPCO, 1996. *State and Territorial Air Pollution Program Administrators and Association of Local Air Pollution Control Officials, "Controlling Particulate Matter Under the Clean Air Act: A Menu of Options," July.*