

**Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina
Proveniente de Fuentes Estacionarias**

CONTRATO NO. 68-D-98-026 DE LA *EPA*
ASIGNACIÓN DE TRABAJO NO. 0-08

Preparado por:

Mr. Kenneth Woodard
Integrated Policy and Strategies Group (MD-15)
Air Quality Strategies and Standards Division
U.S. Environmental Protection Agency,
Research Triangle Park, North Carolina 27711

Octubre 1998

Presentado por:

EC/R Incorporated
Timberlyne Center
1129 Weaver Dairy Road
Chapel Hill, North Carolina 27514

Renuncia

Este reporte ha sido revisado por *Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency*, la Oficina de Planeación y Normas de Calidad del Aire, Agencia de Protección Ambiental en EE.UU., y ha sido aprobada para su publicación. La mención de los nombres de marca o productos comerciales no tiene la intención de constituir un endoso o recomendación para su uso.

Copias

Se encuentran a disposición copias de este documento a través de *Library Services Office (MD-35), U.S. Environmental Protection Agency*, la Oficina de Servicios Bibliotecarios, Agencia de Protección Ambiental en EE.UU., Research Triangle Park, NC 27711; o de *National Technical Information Service*, el Servicio Nacional de Información Técnica, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA 22161 (a cambio de una cuota). Este documento también se encuentra en la Red Mundial (Internet) en el sitio de la Agencia de Protección Ambiental en los E.E. U.U.: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#aptecrpts>

CONTENIDO

TABLAS	IX	
FIGURAS	XI	
1	INTRODUCCIÓN	1-1
1.1	PROPOSITO DE ESTE DOCUMENTO	1-1
1.2	OTROS RECURSOS	1-1
1.3	ORGANIZACIÓN	1-1
1.4	REFERENCIAS	1-3
2	ANTECEDENTES	2-1
2.1	TENDENCIAS EN LAS CONCENTRACIONES DE MATERIA PARTICULADA Y LAS EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA	2-1
2.2	PROYECCIONES PARA PROGRAMAS DE CONTROL Y LAS EMISIONES EN EL FUTURO	2-2
2.3	FUENTES DE EMISIONES DE MP ₁₀ Y MP _{2.5}	2-4
2.3.1	Fuentes De Punto	2-4
2.3.2	Fuentes De Zona	2-4
2.4	CARACTERIZACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE MP _{2.5}	2-5
2.4	REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 2	2-8
3	MEDICIÓN	3-1
3.1	LISTA DE MÉTODOS DE PRUEBA DE EPA PARA MEDICIÓN DE MASA DE MP	3-1
3.2	MÉTODOS DE PRUEBA DE EPA PARA MEDICIÓN DE MASA DE MP DE FUENTES ESTACIONARIAS (PUNTO)	3-3
3.2.1	Método de Prueba 5 de EPA para Masa Total de MP	3-3
3.2.2	Variaciones del Método de Prueba 5 de la EPA: 5A - 5H	3-6
3.2.3	Métodos de Prueba de EPA para MP ₁₀ de Fuentes Estacionarias	3-7
3.2.3.1	Método 201: Emisiones de MP ₁₀ - Procedimiento de Recuperación de Gas de Escape	3-8
3.2.3.2	Método 201A: Determinación de Emisiones de MP ₁₀ - Procedimiento de Razón Constante de Muestreo	3-8
3.2.4	Método de Prueba 17 de EPA: Determinación de Emisiones de MP de Fuentes Estacionarias – Método de Filtración Dentro de la Chimenea	3-8
3.2.5	Método 202 para Medición de MP Condensable	3-9

CONTENIDO (continuación)

3.2.6	Método de Prueba 9 de EPA: Determinación Visual de Opacidad de Emisiones de Fuentes Estacionarias, - Método Alterno 1 para Uso Remoto de <i>Lidar</i>	3-9
3.2.7	Especificaciones de Rendimiento para Sistemas de Monitores de Emisiones Continuo (MEC) Usados para Observar Opacidad	3-10
3.3	OTROS MÉTODOS DE PRUEBA PARA MEDICIÓN DE MASA DE MP DE FUENTES ESTACIONARIAS (PUNTO)	3-10
3.4	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE MP FUGITIVA	3-11
3.5	ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	3-14
3.5.1	Instrumento Colector (de partículas suspendidas) en Cascada	3-14
3.5.2	Ciclones de Muestreo	3-15
3.5.3	Medición de la Distribución de Tamaño en Tiempo Real	3-15
3.5.4	Distribución de Tamaño de Muestras a Granel	3-16
3.6	DETERMINACIÓN DE TAMAÑO Y COMPOSICIÓN	3-17
3.6.1	Método de Prueba 29 de EPA para Metales y MP	3-17
3.6.2	Método de Prueba 0010 (SW-846) ⁴¹ EPA	3-18
3.6.3	Espectrometría	3-19
3.6.3.1	Espectrometría por Absorción Atómica	3-19
3.6.3.2	Espectrometría de Emisión Óptica	3-19
3.6.3.3	Espectrometría de Masa	3-19
3.6.3.4	Análisis de Activación de Neutrones	3-20
3.6.3.5	Espectrometría Fluorescente de Rayos X	3-20
3.6.4	Métodos Electroquímicos	3-20
3.6.5	Métodos Químicos	3-21
3.7	REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 3	3-21
4.	PROPUESTAS PARA LA SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLES Y LA REDUCCIÓN DE LA FUENTE PARA LA MATERIA PARTICULADA	4-1
4.1	SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLE	4-1
4.1.1	Aplicabilidad	4-1
4.1.2	Reducciones de Emisiones por Sustitución de Combustible.	4-2
4.1.3	Costos	4-5
4.1.4	Otros Impactos	4-6
4.2	MODIFICACIÓN / OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO	4-7
4.3	REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 4	4-9
5.	SISTEMAS DE LIMPIEZA DEL GAS DE ESCAPE PARA FUENTES ESTACIONARIAS	

CONTENIDO (continuación)

5.1	TRATAMIENTO PREVIO	5-1
5.1.1	Dispositivos de Precolectión	5.1-1
5.1.1.1	Cámaras de Asentamiento	5.1-1
5.1.1.2	Purificadores	5.1-4
5.1.1.3	Separadores por Momento	5.1-4
5.1.1.4	Separadores con Ayuda Mecánica	5.1-4
5.1.1.5	Ciclones	5.1-8
5.1.2	Eficiencia de Recolección de Precolectores	5.1-12
5.1.2.1	Sedimento por Gravedad	5.1-12
5.1.2.2	Separadores por Momento	5.1-12
5.1.2.3	Separadores con Ayuda Mecánica	5.1-12
5.1.2.4	Ciclones	5.1-16
5.1.3	Aplicabilidad	5.1-20
5.1.4	Costos de Precolectores	5.1-22
5.1.4.1	Costo de Capital de Ciclones	5.1-22
5.1.4.2	Costos Anuales de Ciclones	5.1-24
5.1.5	Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios de Pre-colectores	5.1-27
5.1.6	Acondicionamiento del Gas del Tubo de Escape	5.1-27
5.1.6.1	Acondicionamiento con Trióxido de Azufre	5.1-28
5.1.6.2	Acondicionamiento con Amoníaco	5.1-30
5.1.6.3	Acondicionalmente con Compuestos de Amonio	5.1-31
5.1.6.4	Acondicionamiento con Aminas Orgánicas	5.1-31
5.1.6.5	Acondicionamiento con Alcalíes	5.1-32
5.1.7	Costos de Acondicionamiento de Gas del Tubo de Escape	5.1-32
5.1.8	Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios de Acondicionamiento de Gas del Tubo de Escape	5.1-33
5.1.9	Referencias para la Sección 5.1	5.1-35
5.2	PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	5.2-1
5.2.1	Recolección de Partículas	5.2-1
5.2.1.1	Campo Eléctrico	5.2-1
5.2.1.2	Generación de Corona	5.2-3
5.2.1.3	Cargando Partículas	5.2-4
5.2.1.4	Recolección de Partículas	5.2-4
5.2.2	Mecanismo de Penetración	5.2-5
5.2.2.1	Corona Inversa	5.2-5
5.2.2.2	Re-encauzamiento de Polvo	5.2-6

CONTENIDO (continuación)

5.2.2.3	Escabullimiento de Polvo	5.2-6
5.2.3	Tipos de Precipitadores Electrostáticos	5.2-6
5.2.3.1	PES en Seco	5.2-6
5.2.3.2	PES en Húmedo	5.2-7
5.2.3.3	PES Placa - Alambre	5.2-7
5.2.3.4	PES Tubo - Alambre	5.2-9
5.2.3.5	Otros diseños de PES	5.2-9
5.2.4	Eficiencia de Recolección	5.2-14
5.2.5	Aplicabilidad	5.2-17
5.2.6	Costos de Precipitadores Electrostáticos	5.2-20
5.2.6.1	Costos de Capital	5.2-20
5.2.6.2	Costos Anuales	5.2-24
5.2.7	Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios	5.2-27
5.2.8	Referencias para Sección 5.2	5.2-28
5.3	FILTROS DE TELA	5.3-1
5.3.1	Recolección de Partículas y Mecanismos de Penetración	5.3-1
5.3.2	Tipos de Filtros de Tela	5.3-5
5.3.2.1	Filtros de Tela Limpiados por Agitador	5.3-5
5.3.2.2	Filtros de Tela Limpiados por Aire Invertido	5.3-7
5.3.2.3	Filtros de Tela Limpiados por Chorro Pulsante	5.3-10
5.3.2.4	Otros Diseños de Filtros de Tela	5.3-14
5.3.3	Características de la Tela	5.3-15
5.3.4	Eficiencia de Recolección	5.3-17
5.3.5	Aplicabilidad	5.3-19
5.3.6	Costos de los Filtros de Tela	5.3-22
5.3.6.1	Costos de Capital	5.3-22
5.3.6.2	Costos Anuales	5.3-26
5.3.7	Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios	5.3-30
5.3.8	Referencias para la Sección 5.3	5.3-31
5.4	LIMPIADORES EN HÚMEDO	5.4-1
5.4.1	Recolección de Partículas y Mecanismos de Penetración	5.4-1
5.4.2	Tipos de Limpiadores Húmedos	5
5.4.2.1	Cámaras de Aspersión	5.4-2-4-2
5.4.2.2	Limpiadores con Lecho Embalado	5.4-3
5.4.2.3	Limpiadores con Placas de Repercusión	5.4-9
5.4.2.4	Limpiadores con Ayuda Mecánica	5.4-9

CONTENIDO (continuación)

5.4.2.5	Limpiadores <i>Venturi</i>	5.4-13
5.4.2.6	Limpiadores con Orificios	5.4-13
5.4.2.7	Limpiadores por Condensación	5.4-17
5.4.2.8	Limpiadores Cargados	5.4-17
5.4.2.9	Limpiadores con Lecho de Fibra	5.4-17
5.4.3	Eficiencia de Recolección	5.4-21
5.4.4	Aplicabilidad	5.4-21
5.4.5	Costos de Limpiadores en Húmedo para MP	5.4-26
5.4.5.1	Costos de Capital	5.4-26
5.4.5.2	Costos Anuales	5.4-30
5.4.6	Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios	5.4-35
5.4.7	Referencias para la Sección 5.4	5.4-38
5.5	INCINERADORES	5.5-1
5.5.1	Mecanismos de Control de Incineradores	5.5-1
5.5.2	Tipos de Incineradores	5.5-3
5.5.2.1	Incineradores Termales	5.5-3
5.5.2.1.1	Incinerador Termal con Quemador Discreto	5.5-4
5.5.2.1.2	Incinerador Termal con Quemador Distribuido	5.5-4
5.5.2.2	Incineradores Catalíticos	5.5-4
5.5.2.3	Equipo de Recuperación de Calor	5.5-7
5.5.3	Eficiencia de Control	5.5-9
5.5.3.1	Eficiencia de Control para Compuestos Orgánicos Volátiles	5.5-9
5.5.3.2	Eficiencia de Control de Materia Particulada	5.5-9
5.5.4	Aplicabilidad	5.5-9
5.5.5	Costos de Incineradores	5.5-11
5.5.5.1	Costos de Capital	5.5-12
5.5.5.2	Costos Anuales	5.5-15
5.5.6	Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios	5.5-19
5.5.7	Referencias para la Sección 5.5	5.5-19
6.	CONTROLES DE EMISIONES FUGITIVAS INDUSTRIALES	6-1
6.1	CIRCUNVALACIÓN Y VENTILACIÓN	6-1
6.1.1	Sistemas de Ventilación Local	6-2
6.1.2	Circunvalación de Edificio / Evacuación	6-3
6.2	OPTIMIZACIÓN DE EQUIPO Y OPERACIÓN	6-6

CONTENIDO (continuación)

6.2.1	Reducción de Extensión de la Fuente y Mejoramiento	6-6
6.2.2	Optimización del proceso / Modificación	6-7
6.2.3	Prevención de Fugas y Detección Otras Prácticas de Buena Operación y Mantenimiento	6-9
6.3	COSTOS DE LOS EXTRACTORES	6-9
6.4	CONTROL DEL POLVO FUGITIVO	6-10
6.5	REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 6	6-11
7.	TECNOLOGÍAS EMERGENTES	7-1
7.1	TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA FILTROS DE TELA	7-1
7.1.1	Cerámicas: Elementos del Filtro de Cerámica y Mejoras con Fibras Cerámicas	7-1
7.1.2	Nuevas Fibras Finas 1.1 <i>dtex</i>	7-1
7.1.3	Filtración por Tela Estimulada Electrostáticamente (FTES)	7-4
7.2	TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA (PES)	7-4
7.2.1	Golpeadores con Bocina Sónica	7-4
7.2.2	Pre-cargador PES de Tubo Frío	7-4
7.2.3	Secciones Re-colectoras Alternadas Cargadoras y Cortos PES (SUPER ESP)	7-5
7.2.4	Sistemas Avanzados de Control PES - Basados en Computadoras	7-5
7.3	DISPOSITIVOS DE COMBINACIÓN EMERGENTES.	7-5
7.4	TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA LIMPIADORES	7-6
7.4.1	Limpiador Tipo Venturi con Orificio Anular	7-6
7.4.2	Limpiador con Tejido de Red de Agua	7-6
7.5	TECNOLOGÍAS EMERGENTES DE RECOLECTORES MECÁNICOS	7-7
7.6	TECNOLOGÍAS EMERGENTES DE CONTROL DE POLVOS FUGITIVOS	7-7
7.6.1	Ionizador de MP de Alto Voltaje	7-7
7.6.2	Neblina Seca	7-8
7.7	TECNOLOGÍAS EMERGENTES DE CONTROL SIMULTANEO DE CONTAMINACIÓN	7-8
7.7.1	Filtro Catalítico de Tela <i>SNRB (SO_x-NO_x-Rox Box)</i>	7-8
7.7.2	Filtros de Tela Recubiertos de Catalizador	7-8
7.8	REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 7	7-9
APÉNDICE A:	LISTA DE DOCUMENTOS DE RECURSO PARA EL CONTROL DE LA MP Y LOS PRECURSORES DE LA MP	A-1

CONTENIDO (continuación)

APÉNDICE B: INDICES VATAVUK PARA EL COSTO DEL CONTROL DE LA
CONTAMINACIÓN DEL AIRE B-1

TABLAS

Tabla 2-1	Resumen de las Tendencias en las Emisiones entre 1987 y 1993 (referencia 2)	2-3
Tabla 3-1	Métodos de Prueba de la <i>EPA</i> para la <i>MP</i>	3-2
Table 3-2	Métodos de Prueba 1 al 4 de la <i>EPA</i> : Procedimientos Generales para Tomar Muestras de Chimenea	3-4
Tabla 4-1	Reducciones Potenciales de las Emisiones de MP_{10} con el Cambio de Combustibles (referencias 1, 4 y 5)	4-3
Tabla 4-2	Reducciones Potenciales de las Emisiones de $MP_{2.5}$ con el Cambio de Combustibles (referencias 1, 4 y 5)	4-3
Tabla 4-3	Precios Promedio del Carbón, el Aceite y el Gas Natural	4-5
Tabla 4-4	Reducciones Potenciales de SO_x con el Cambio de Combustibles	4-6
Tabla 5.1-1	Características de los Ciclones Comunes	5.1-11
Tabla 5.1-2	Parámetros de Costo Anuales para los Ciclones (referencia 9).	5.1-25
Tabla 5.1-3	Factores de Costo Anuales para los Ciclones (Referencia 20).	5.1-26
Tabla 5.1-4	Costos del Acondicionamiento del Gas de la Torre de Chimenea	5.1-33
Tabla 5.2-1	Eficiencias de Recolección Cumulativa de $MP-10$ y $MP-2.5$ para <i>PES</i> en Camara de Combustión de Carbón, Operaciones Primarias de Cobre, Operaciones de Producción de Hierro y Acero (11Referencia)	5.2-18
Tabla 5.2-2	Aplicación Typical Industrial de Precipitadores Electroestáticos (Referencias 2 y 12)	5.2-18
Tabla 5.2-3	Factores de Costo para los Precipitadores Electrostáticos (referencia 10)	5.2-20
Tabla 5.2-4	Costo Anual de los Parámetros para los Precipitadores Electrostáticos (Referencia 14)	5.2-25
Tabla 5.2-5	Costo Anual de los Factores para los Precipitadores Electrostáticos (Referencia 14)	5.2-26
Tabla 5.3-1	Relaciones de Gas a Tela (en pies cúbicos reales por minuto por pie cuadrado) para las Aplicaciones Industriales Comunes de los Filtros de Tela (Referencias 4 and 13)	5.3-5
Tabla 5.3-2	Rangos de temperatura, y Resistencias Físicas y Químicas de Telas Industriales Comunes (referencia 2)	5.3-16
Tabla 5.3-3	Eficiencias de Recolección Cumulativa de $MP-10$ y $MP-2.5$ para los Filtros de Tela en Cámaras de Combustión de Carbón, Hornos de Ferro aleación con Arco Eléctrico, y Operaciones de Producción de Hierro y Acero (Referencia 15)	5.3-19
Tabla 5.3-4	Métodos Típicos de Limpieza y Telas para Aplicaciones Industriales de Filtros de Tela (Referencia 2)	5.3-19
Tabla 5.3-5	Factores de Costo de Capital para los Filtros de Tela (Referencia 16)	5.3-22

TABLAS (continuación)

Tabla 5.3-6	Parámetros de Costo Anuales para los Filtros de Tela (Referencia 17)	5.3-28
Tabla 5.3-7	Factores de Costo Anuales para los Filtros de Tela ((Referencia 17)	5.3-29
Tabla 5.4-1	Eficiencia de Recolección Cumulativa de MP-10 y MP-2.5 de los Depuradores en Húmedo en Cámaras de Combustión de Carbón, Aceite, Madera y Corteza; y Unidades de Producción de Coque Referencia	5.4-21
Tabla 5.4-2	Aplicaciones Industriales Actuales de los Depuradores en Húmedo (Referencias, 2 y 8)	5.4-22
Tabla 5.4-3	Potencial de Control de MP ₁₀ / MP _{2.5} para Varios Diseños de Depurador.	5.4-23
Tabla 5.4-4	Factores De Costo de Capital para un Depurador Típico (Referencia 9).	5.4-25
Tabla 5.4-5	Velocidades de Gas, Relaciones de Líquido a Gas, Caídas de Presión Recomendadas para los Depuradores de Particulados en Húmedo (Referencia 10).	5.4-26
Tabla 5.4-6	Costo Anual de los Parámetros para los Depuradores de Particulados (Referencia 11).	5.4-32
Tabla 5.4-7	Factores de Costo Anuales para los Depuradores de Particulados (Referencia 11).	5.4-33
Tabla 5.5-1	Eficiencias de Control para Incineradores Termales en Procesos de Manufactura de Anhídrido Ftálico (Referencia 10)	5.5-9
Tabla 5.5-2	Requisitos Operacionales para el Rendimiento Satisfactorio de un Incinerador para Varias Aplicaciones Industriales y Niveles de Control (Referencia 11)	5.5-11
Tabla 5.5-3	Factores de Costo de Capital para Incineradores Termales (Referencia 11)	5.5-13
Tabla 5.5-4	Parámetros de Costo Anual para los Incineradores (Referencia 11)	5.5-16
Tabla 5.5-5	Factores de Costo Anuales para los Incineradores (Referencia 12).	5.5-17
Tabla 6.1	Eficiencias de Control Estimadas para las Técnicas de Reducción de la Altura de Caída (Referencia 7)	6-6
Tabla 6-2	Parámetros para la Ecuación de Costo de Extractores (Referencia 8)	6-9
Tabla 7-1	Resumen de las Tecnologías de Control de MP Emergentes	7-2

FIGURAS

Figura 2-1	Composición de la $MP_{2.5}$ en los Estados Unidos Orientales	2-6
Figura 2-2	Composición de la $MP_{2.5}$ en los Estados Unidos Occidentales	2-7
Figura 3-1	Tren de Muestreo del Método de Prueba 5 de la <i>EPA</i>	3-5
Figura 5.1-1	Cámara de Asentamiento por Expansión (adaptada de la Referencia 2)	5.1-2
Figura 5.1-2	Cámara de Asentamiento de Bandejas Múltiples (adaptada de la Referencia 2).	5.1-3
Figura 5.1-3	Purificadores en Serie (Referencia 3).	5.1-5
Figura 5.1-4	Separadores por Momento (Referencias 2 y 3).	5.1-6
Figura 5.1-5	Separador con Ayuda Mecánica (Referencia 3).	5.1-7
Figura 5.1-6	Ilustración del Vértice Doble Dentro de un Ciclón (Referencia 1).	5.1-9
Figura 5.1-7	Cuatro Tipos Básicos de Ciclones (adaptados de la Referencia 2).	5.1-10
Figura 5.1-8	Dimensiones Estándares de un Ciclón (Referencia 6).	5.1-11
Figura 5.1-9	Ciclón Múltiple Típico (Referencia 3).	5.1-13
Figura 5.1-10	Curva de Eficiencia de Recolección Fraccionada Típica para Cámara de Asentamiento (Referencia 2).	5.1-14
Figura 5.1-11	Impacto de Densidad de las Partículas sobre Eficiencia de Recolección Fraccional de Cámaras de Asentamiento (Referencia 3).	5.1-14
Figura 5.1-12	Curva de Eficiencia de Recolección Fraccional Típica para Separador de Momento (Referencia 2).	5.1-15
Figura 5.1-13	Curva de Eficiencia de Recolección Fraccional para Separador con Ayuda Mecánica (Referencia 2).	5.1-15
Figura 5.1-14	Curva de Eficiencia de Ciclón Típico en Escalas Log-log & Lineales (Referencias 6 y 15).	5.1-17
Figura 5.1-15	Dimensiones de Ductos de Entrada y Salida de un Ciclón para un Diseño Optimizado de Ciclón, de Acuerdo a Teoría de Eficiencia de Ciclones de Iozia y Leith (Referencia 17).	5.1-19
Figura 5.1-16	Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para Iso Ciclones Múltiples en Caldera Accionada por Aceite Residual (Referencia 5).	5.1-20
Figura 5.1-17	Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para Ciclones Múltiples en Calderas de Carbón y Corteza de Madera, Con o Sin Reinyección Ceniza Flotante (Reference 5).	5.1-21
Figura 5.1-18	Inversión Total de Capital vs. Superficie del Ducto de Entrada para 0.2 pies cuadrados < Superficie del Ducto < 2.64 pies cuadrados (Referencia 19).	5.1-23
Figura 5.1-19	Inversión Total de Capital vs. Superficie del Ducto de Entrada para Superficie del Ducto > 2.64 pies cuadrados (Referencia 19).	5.1-24
Figura 5.2-1	Vista de un Corte de un Precipitador Electrostático de Tubo-Alambre (Referencia 2).	5.2-2
Figura 5.2-2	Precipitador Electrostático de Placa-Alambre (Referencia 2).	5.2-8
Figura 5.2-3	Precipitador Electrostático de Tubo-Alambre (Referencia 2).	5.2-9

FIGURAS (continued)

Figura 5.2-4	Arreglos Cuadrados, Hexagonales y Circulares de Tubo para Precipitador de Tubo-Alambre (adaptada de la Referencia 4).	5.2-10
Figura 5.2-5	Electrodo con Marco Rígido (Referencia 2).	5.2-12
Figura 5.2-6	Varios Electroodos de Descarga y Diseños de Placas de Colección (Referencia 2).	5.2-13
Figura 5.2-7	Precipitador de Placas Concéntricas (Referencia 3).	5.2-14
Figura 5.2-8	Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para Precipitadores Electrostáticos en Calderas Accionadas por Carbón, Productores Primarios de Cobre, y Operaciones de Producción de Hierro y Acero (Referencia 17)	5.2-17
Figura 5.2-9	Efecto de la Eficiencia de Recolección sobre los Costos de los PES (Referencia 14).	5.2-22
Figura 5.2-10	Efecto del Uso de los Materiales Resistentes a la Corrosión sobre los Costos de Inversión de Capital Total de los PES (Referencia 14).	5.2-23
Figura 5.2-11	Costos de Inversión de Capital Total para los PES Con y Sin Varios Detalles de Diseño Estándares (Referencia 14).	5.2-23
Figura 5.3-1	Mecanismos de Recolección de la Filtración por Tela (referencia 3).	5.3-2
Figura 5.3-2	Eficiencia Fraccional de los Filtros de Tela vs. el Tamaño de las Partículas (Referencia 2).	5.3-4
Figura 5.3-3	Vista de un Corte de un Filtro de Tela con Agitador (referencia 1).	5.3-7
Figura 5.3-4	Mecanismo de Agitación Típico (Referencia 2).	5.3-8
Figura 5.3-5	Diseño Típico de un Compartimiento de un Filtro de Tela con Limpieza de Aire Reverso (Referencia 2).	5.3-10
Figura 5.3-6	Filtro de Tela de Aire Reverso con Mecanismo de Viaje y Recolección de la Capa Externa (Referencia 3).	5.3-11
Figura 5.3-7	Esquema de un Filtro con Propulsión a Chorro con una Vista Aumentada de la Superficie de Entrada del Pulso (Referencia 1).	5.3-13
Figura 5.3-8	Eficiencia de Recolección Cumulativa para Filtros de Tela en Combustores de Carbón, Hornos de Ferroaleación con Arco Eléctrico, Operaciones de Producción de Hierro y Acero (Referencia 15)	5.3-18
Figura 5.3-9	Efecto del Mecanismo de Limpieza sobre Costos de Capital de Filtros de Tela (Referencia 17).	5.3-24
Figura 5.3-10	Efecto de las Relaciones de Gas a Tela sobre los Costos de Capital de los Filtros de Tela. Efecto de Razón Gas-a-Tela en Filtros de Tela Costos de Capital (Referencia 17).	5.3-24
Figura 5.3-11	Efecto del Uso de Aislante y Acero Inoxidable sobre los Costos de Capital de los Filtros de Tela (Referencia 17).	5.3-25
Figura 5.3-12	Efectos del Tipo de Tela sobre los Costos de Capital de los Filtros de Tela con Aire Invertido, G/C = 2.5 (referencia 17).	5.3-27

FIGURAS (continued)

Figura 5.3-13	Efectos del Tipo de Tela sobre los Costos de Capital de los Filtros de Tela con Propulsión a Chorro, G/C = 2.5 y G/C = 5 (Referencia 17).	5.3-27
Figura 5.3-14	Costos Anuales de Operación de los Filtros de Tela (Referencia 17).	5.3-29
Figura 5.4-1	Diagrama Esquemático de un Depurador con Torre de Aspersión (Referencia 2).	5.4-4
Figura 5.4-2	Diagrama Esquemático de Depurador Ciclónico con Cámara de Aspersión (Referencia 1)	5.4-5
Figura 5.4-3	Materiales de Embalaje Típicos para los Depuradores de Lecho Embalado (Referencia 2).	5.4-6
Figura 5.4-4	Diagrama Esquemático de un Depurador con Torre Embalada (Referencia 2).	5.4-7
Figura 5.4-5	Diseños de placa Comunes Limpiadores de Golpe de Placa (Adaptado de Referencia 2).	5.4-9
Figura 5.4-6	Diagrama esquemático de Limpiador de Torre de Placa (adaptado de Referencia 2)	5.4-10
Figura 5.4-7	(Referencia 1).Diagrama de un Limpiador con ayuda Mecánica	5.4-11
Figura 5.4-8	Diagrama Esquemático de un Limpiador de Venturi con Ciclónico (Referencia 1).	5.4-13
Figura 5.4-9	Diagrama de un Limpiador de Orificio (Referencia 1).	5.4-14
Figura 5.4-10	Diagrama de un Eyector de Lodo en un Limpiador del Orificio (Referencia 2)	5.4-15
Figura 5.4-11	Diagrama Esquemático de un Limpiador de Crecimiento " de Condensación " (adapted from Referencia 4).	5.4-17
Figura 5.4-12	Diagrama Esquemático de Limpiador Húmedo Cobrado (adapted from Referencia 2).	5.4-18
Figura 5.4-13	Datos de Eficacia de Colección Cumulativos para PM Wet los Limpiadores a Carbón, Aceite, Madera, y Fuentes de Combustión de corteza, y Cok, Funcionamiento de la producción (Referencia 6).	5.4-20
Figura 5.4-14	Costos de Capital de los Depuradores Tipo Venturi con Velocidad de Flujo de Entrada del Gas <19,000 pies cúbicos reales por minuto (Referencia 11)	5.4-28
Figura 5.4-15	Costos de Capital de los Depuradores Tipo Venturi con Velocidad de Flujo de Entrada del Gas >19,000 pies cúbicos reales por minuto (Referencia 11)	5.4-28
Figura 5.4-16	Costos de Capital de los Depuradores con Placa de Repercusión con Velocidad de Flujo de Entrada del Gas < 77,000 pies cúbicos reales por minuto (Referencia 11)	5.4-29

FIGURAS (continued)

Figura 5.4-17	Costos de Capital de los Depuradores con Placa de Repercusión con Velocidad de Flujo de Entrada del Gas > 77,000 pies cúbicos reales por minuto (Referencia 11)	5.4-29
Figura 5.4-18	Costos de Capital de los Depuradores con Lecho Embalado Vertical (Referencia 9).	5.4-30
Figura 5.4-19	Costos de Capital de los Depuradores con Lecho Embalado Horizontal (Referencia 9)	5.4-30
Figura 5.5-1	Tiempos de Residencia Teóricos Calculados para la MP Proveniente del Coque de Diversos Tamaños en un Incinerador, a Varias Temperaturas	5.5-2
Figura 5.5-2	Diagrama Esquemático de un Incinerador Termal con Quemador Discreto (Referencia 4)	5.5-4
Figura 5.5-3	Diagrama Esquemático de un Incinerador Termal con Quemador Distribuido (Referencia 4)	5.5-6
Figura 5.5-4	Diagrama Esquemático de un Incinerador Catalítico (referencia 4).	5.5-7
Figura 5.5-5	Inversión de Capital Total vs, Velocidad de Flujo para un Incinerador Termal con 0, 35 y 50 Por Ciento de Recuperación de Calor Recuperativo (Referencia 12).	5.5-14
Figura 5.5-6	Inversión de Capital Total vs, Velocidad de Flujo para un Incinerador Termal con 85 y 95 Por Ciento de Recuperación de Calor Recuperativa (Referencia 12)	5.5-14
Figura 5.5-7	Curvas de Costo Anuales para los Incineradores con Recuperación de Calor (RC) Recuperativa (REC) o Re-generativa (REG) (referencia 11).	5.5-18
Figura 6-1	Esquema de un Extractor Golpeador de Residuo en un Horno de Explosión (Referencia 5).	6-3
Figura 6-2	Esquema de un Sistema de Ventilación Local en una Estación de Carga por Montacargas (Referencia 5).	6-4

1. INTRODUCCIÓN

La *Environmental Protection Agency (EPA)*, Agencia de Protección Ambiental en EE. UU., ha analizado información recientemente sobre los efectos en la salud de las concentraciones elevadas de la materia particulada (MP) respirable en el aire ambiental. Este análisis condujo a revisiones de *national ambient air quality standards (NAAQS)*, las normas nacionales de calidad del aire ambiental, para MP. La *EPA* también ha añadido un nuevo “indicador” para medir las concentraciones de MP respirable. El indicador previo era la MP_{10} , la cual se define como la materia particulada que posee un diámetro aerodinámico nominal de 10 micras (μm) o menor. El indicador adicional se basa en las partículas más pequeñas, la $MP_{2.5}$, definida como la MP menor o igual a 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico. ¹

1.1 PROPOSITO DE ESTE DOCUMENTO

El propósito de este documento es el de apoyar el desarrollo de estrategias de implementación para obtener estándares ambientales revisados para la MP, basados en la $MP_{2.5}$ y la MP_{10} . Este documento es una revisión de la guía de 1982 de la *EPA* sobre *Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources*², técnicas de control para emisiones de particulados provenientes de fuentes estacionarias. El enfoque de este documento es sobre el control de las emisiones de MP_{10} y $MP_{2.5}$ provenientes de fuentes industriales. Este documento no trata las fuentes no industriales, tales como la combustión residencial de leña y el polvo extendido por el viento, los cuales son cubiertos en documentos de guía por separado.

Aunque son responsables por una fracción menor de las emisiones nacionales de MP_{10} que las fuentes no industriales (véase la sección 2), las fuentes industriales pueden tener impactos ambientales significantes. Estos pueden ser especialmente importantes en zonas urbanizadas que típicamente son centros tanto de población como de actividad industrial. De manera adicional, las emisiones de MP provenientes de fuentes industriales tienden a ser concentradas en los menores rangos de tamaño, aumentando su importancia en la implementación de un estándar potencial para la $MP_{2.5}$.

1.2 OTROS RECURSOS

La *EPA* ha desarrollado recientemente documentos sobre técnicas de control para un número de fuentes no industriales de emisiones de MP. Además, se han preparado reportes examinando los niveles totales de control que podrían ser logrados tanto en las emisiones directas de MP, y en las emisiones de contaminantes gaseosos que pueden reaccionar para producir MP secundaria. La MP secundaria es producida principalmente de los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el amoníaco (NH_3), y los compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos gases precursores reaccionan entre sí y con el oxígeno y el agua en la atmósfera para formar compuestos condensables. El apéndice A proporciona un resumen de los documentos sobre las técnicas de control y otros documentos de la *EPA* disponibles para apoyar el desarrollo de estrategias de control para las emisiones primarias de MP_{10} y $MP_{2.5}$, y las emisiones de gases precursores para la MP secundaria.

1.3 ORGANIZACIÓN

Este documento está organizado en siete secciones, incluyendo esta introducción. La sección proporciona información antecedente sobre las tendencias en la calidad del aire y emisiones de MP, impactos futuros proyectado de los programas de control, y fuentes principales de emisiones de MP₁₀ y de MP_{2.5} en la actualidad.

La sección 3 discute los métodos disponibles para medir las emisiones de MP. Estas técnicas son necesarias para estimar el nivel de emisiones provenientes de la fuente antes y después del control, tanto como para determinar la eficiencia de las técnicas/dispositivos de control de MP. Esta sección discute los procedimientos tanto establecidos como innovativos que han sido desarrollados para medir la masa y/o tamaño de la MP, especialmente para la MP₁₀ y MP_{2.5}. Las técnicas para identificar y medir las especies químicas de la MP son discutidas de igual manera.

La sección 4 presenta alternativas para reducir las emisiones de MP a través del uso de técnicas de sustitución de combustible y reducción de la fuente, o sea, modificaciones de proceso u optimización.

La sección 5 es el corazón de este documento, y contiene las descripciones detalladas de los dispositivos primarios usados para controlar la MP en fuentes estacionarias: precipitadores electrostáticos (PES), filtros de tela, depuradores en húmedo e incineradores. Para cada uno de estos dispositivos de control, los diversos diseños de los dispositivos se discuten junto con los principios de operación. El rango de eficiencias de control para cada dispositivo se discute enseguida y se presentan las categorías de fuentes a las cuales se aplican los dispositivos. Los costos de capital y anuales para cada dispositivo también son incluidos en la sección 5 junto con la energía y otros impactos ambientales secundarios de las tecnologías. La sección 5 inicia con una discusión de las técnicas de pre-tratamiento, que es similar en formato a la discusión sobre el dispositivo primario. Los dispositivos de pre-tratamiento son usados para reducir el cargado de MP sobre los dispositivos de control primarios, con el propósito de reducir el tamaño y, potencialmente, los costos del dispositivo de control primario, y para incrementar posiblemente la eficiencia de recolección de MP total.

La sección 6 discute los controles de emisiones fugitivas industriales que incluyen recintos, técnicas de ventilación y optimización de equipo y operaciones. Cuando se encuentran disponibles, se presentan las eficiencias de control reportadas de las medidas de control.

La sección 7 discute las tecnologías emergentes para el control de MP que están siendo investigadas por la EPA y la industria para aumentar la eficiencia de control de MP y/o para eliminar las partículas finas. Muchas de estas tecnologías han sido implementadas en operaciones piloto o a plena escala.

1.4 REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 1

1. Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter: Policy Assessment of Scientific and Technical Information - External Review Draft. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1996.
2. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources--Volume 1. (EPA-450/3-81-005a). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.

2. ANTECEDENTES

Las normas *national ambient air quality standards (NAAQS)*, normas nacionales para la calidad del aire ambiental para la materia particulada (MP) fueron establecidas por primera vez en 1971. Estos estándares aplicados a la MP suspendida total (PST) tal como se mide mediante un mostrador de alto volumen. El diseño de mostrador favoreció la recolección de partículas con diámetros aerodinámicos hasta de 50 μ m. En 1987, la EPA cambió el indicador para la MP de la PST a la MP₁₀. Los niveles de la norma *NAAQS* para la MP₁₀ fueron establecidos a un promedio de 24 horas de 150 μ g/m³ (con no más de un sobrepaso anticipado por año), y un promedio anual de 50 μ g/m³ (promedio aritmético anticipado).¹ En 1997, la EPA revisó la forma de la norma *NAAQS* para la MP₁₀ de 24 horas (diaria) y estableció la MP_{2.5} como un nuevo indicador de MP fina.

Previo a la revisión, la norma *NAAQS* para la MP₁₀ de 24 horas fue cumplida cuando el número anticipado de días por año de calendario con una concentración promedia de 24 horas por encima de 150 μ g/m³ fue menor o igual a uno (promediada durante 3 años de calendario). La norma revisada para la MP₁₀ de 24 horas se cumple cuando el percentil de 99 de la distribución de las concentraciones de 24 horas en cada monitor en una zona por un período de un año (promediado sobre 3 años de calendario) no supere los 150 μ g/m³. La norma anual para MP₁₀ no fue impactada por las revisiones de 1997.

Las nuevas *NAAQS* para la MP_{2.5} están establecidas en una concentración promedio anual menor o igual a 15 μ g/m³ y una concentración de 24 horas (diaria) menor o igual a 65 μ g/m³. El estándar anual se cumple cuando el promedio de tres años del promedio aritmético anual de las concentraciones de 24 horas durante un período de un año (promediado sobre 3 años de calendario) no excede los 65 μ g/m³ en cada monitor dentro de una zona.

2.1 TENDENCIAS EN LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE MATERIA PARTICULADA Y LAS EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

El reporte más reciente de la *EPA* sobre las tendencias en las concentraciones ambientales cubre a la MP₁₀ entre los años 1988 y 1996.² Se pueden obtener datos completos sobre las concentraciones ambientales de MP₁₀ de 900 sitios de monitoreo con localizaciones urbanas, suburbanas y rurales. La concentración aritmética anual promedia de MP₁₀ para todos los sitios (el promedio nacional) durante 1988 fue de 32 μ g/m³. Para 1996, la concentración aritmética anual promedia había disminuído a 24 μ g/m³, una mejoría del 25 por ciento sobre los niveles de 1988. La tendencia de las concentraciones de MP₁₀ en los sitios urbanos y suburbanos fue esencialmente la misma con el promedio anual disminuyendo desde alrededor de 34 μ g/m³ en 1988 hasta alrededor de 26 μ g/m³ en 1996. El promedio aritmético anual en sitios rurales en 1988 fue de 25 μ g/m³. El promedio disminuyó en un 20 por ciento a 20 μ g/m³ en 1996.

Un análisis independiente de las tendencias de la MP₁₀ por *Darlington, et.al.*, encontró las

mismas mejorías en las concentraciones.³ Los datos provenientes de los sitios de monitoreo que reportaron al menos una lectura cada año entre 1988 y 1995 (585 sitios) al *Atmospheric Information Retrieval System (AIRS)*, el sistema de recuperación de información atmosférica, fue usado en este análisis. A nivel nacional, el análisis indicó una reducción del 24 por ciento en las concentraciones de MP_{10} desde 34 : g/m^3 en 1988 a 26 : g/m^3 en 1995. Alrededor de 160 de los sitios de monitoreo usados por *Darlington* fueron localizados en condados designados como lugares donde no se logró la concentración de MP_{10} y 425 fueron localizados en condados donde sí se logró. La concentración anual promedia de todos los condados donde no se logró en 1988 fue de 41 : g/m^3 . Esto se redujo en un 26 por ciento a 31 : g/m^3 en 1995. El promedio en los condados donde sí se logró, disminuyó en un 20 por ciento, de 30 : g/m^3 en 1988 a 24 : g/m^3 en 1995.

La tabla 2-1 muestra las tendencias en las emisiones de MP_{10} para las principales fuentes de emisiones de 1987 a 1996. La tabla muestra bastante fluctuación en las emisiones, principalmente debido a los cambios en la erosión natural del viento. También debe ser notado que las estimaciones de las emisiones fugitivas de polvo en la tabla están sujetas a un alto grado de inseguridad (por ejemplo, los caminos pavimentados y no pavimentados, la construcción, las operaciones agrícolas y la erosión por el viento). Estas estimaciones de las emisiones fugitivas de polvo se encuentran sobreestimadas al compararse con las mediciones ambientales de los componentes relacionados a los minerales de la $MP_{2.5}$.

Los datos sobre las concentraciones ambientales no se encuentran disponibles para evaluar las tendencias históricas en las concentraciones ambientales o emisiones de $MP_{2.5}$. Sin embargo, la visibilidad puede ser vista como una medida sustituta de las tendencias en partículas finas en el rango de 2.5 micrómetros y por debajo. Las partículas en este rango de tamaño contribuyen de gran manera a la dispersión y la absorción de la luz (conocida como extinción de la luz). Existen dos grandes zonas contiguas de neblina en la parte continental de los Estados Unidos. Una cubre la parte oriental de los Estados Unidos y la otra incluye los estados occidentales del Pacífico. Ha ocurrido un descenso marcado en la neblina durante el período de 30 años entre 1960 y 1990 en los estados occidentales del Pacífico. La sección del centro del continente de la zona occidental de neblina ha permanecido relativamente constante durante este período, mientras el occidente de los Estados Unidos ha demostrado un cambio de neblina predominante en el invierno a neblina predominante en el verano.²

2.2 PROYECCIONES PARA PROGRAMAS DE CONTROLES Y EMISIONES EN EL FUTURO

La *Office of Policy, Planning, and Evaluation (OPPE)*, la oficina de política, planificación y Evaluación en EE.UU., ha proyectado los niveles de emisión para la MP_{10} y la $MP_{2.5}$ basadas en la implementación de programas de control requeridos bajo *Clean Air Act Amendments CAAA*, (Enmiendas al Acta del Aire Limpio) de 1990. Se anticipa que los programas de control para la MP bajo el Título I de la *CAAA* ejercerán solamente un pequeño impacto sobre las emisiones en total, en el futuro—una reducción de alrededor del 3 por ciento para la MP_{10} y menos del 0.1 por ciento de la

MP_{2.5}.²

Debido a la falta de datos disponibles, las proyecciones de la *OPPE* no tomó en cuenta el impacto de las regulaciones para los contaminantes peligrosos del aire (CPA) bajo el Título III del *CAAA*. Sin embargo, un número de los CPA del Título III son metales que son emitidos en forma de MP fina, tanto en bruto como en cantidades de elementos menores. Los estándares implementados para estos CPA particulados tendrán algunos impactos sobre las emisiones de MP₁₀ y MP_{2.5}.

Se proyectan reducciones sustanciales en las emisiones de SO₂ como resultado de los programas de control implementados bajo el Título IV del *CAAA*. De manera adicional, las reducciones en las emisiones de NO_x son proyectadas como resultado de los programas de control implementados bajo el Título IV, y se proyectan reducciones tanto en los NO_x como en los COV como resultado de los programas de control del ozono bajo el Título I. Todos estos contaminantes son precursores de MP secundaria. Como resultado, se anticipa que la reducción de emisiones de estos contaminantes produzca u reducción en la formación de MP secundaria.

Tabla 2-1. Resumen de las Tendencias en las Emisiones de MP-10 entre 1987 y 1996 (Referencia 2)

	Emisiones Estimadas (millones de toneladas)									
	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Combustión de combustible - servicios públicos e industrial	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
Combustión de combustible - leña residencial y otros	0.8	0.9	0.9	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
Procesamiento de Metales	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Otros industriales	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Combustión al abierto y otro desecho de residuos	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Vehículos motorizados y motores fuera de carretera	0.9	1	1	0.9	0.9	1	1	1	0.9	0.9
Incendios de campo y quema supervisada	1	1.7	0.9	1.2	0.9	0.8	0.8	1	0.8	0.8
*Agricultura	7.3	7.5	7.3	5.1	5.1	4.9	4.5	4.7	4.7	4.7
*Erosión natural por el viento	1.6	18.1	12.1	2.1	2.1	2.2	0.5	2.2	1.1	5.3
*Caminso pavimentados y de terracería	16.6	18.3	17.6	13.5	13.6	13.3	13.9	13.9	12.8	12.7
*Construcción, minería y extracción de minerales	12.5	12	11.7	4.6	4.4	4.8	5.1	5.8	4.2	4.5
Total	42.5	61.3	53.2	29.9	29.6	29.5	28	30.9	26.9	31.3

* Las emisiones provenientes de operaciones agrícolas, erosión del viento, caminos pavimentados y de terracería, y construcción son demasiado grandes al ser reconciliados con los niveles de los componentes minerales de la MP_{2.5} medida en el aire ambiental.

2.3 FUENTES DE EMISIONES DE MP₁₀ y MP_{2.5}

Las fuentes de emisiones pueden ser clasificadas de manera general como fuentes de punto y fuentes de zona. Las fuentes de punto son grandes fuentes de emisiones que son tratadas en base de punto a punto en los inventarios de emisiones. Estas son típicamente instalaciones industriales, servicios públicos o grandes fuentes de emisiones comerciales o institucionales. Las fuentes de zona se definen como fuentes de emisiones que son demasiado numerosas o dispersas para ser tratadas individualmente en un inventario de emisiones. Esta categoría también incluye vehículos de carretera, y motores y equipo que no son de camino.

Las emisiones discutidas en las próximas dos secciones se basan en *1990 National Inventory*, Inventario Nacional de EE.UU. en 1990. El Inventario Nacional de 1990 atribuyó aproximadamente el 90 por ciento de las emisiones de MP₁₀ y el 70 por ciento de las emisiones de MP_{2.5} al polvo fugitivo proveniente de la agricultura, los caminos pavimentados, los caminos de terracería y las actividades de construcción. Mientras que éstas son ciertamente fuentes principales de emisiones de MP, la confianza en estas estimaciones es baja. Se cree que estas estimaciones sean altas, y el inventario está siendo examinado y revisado para mejorar estas estimaciones. Por esta razón, las dos secciones siguientes discuten a las fuentes principales de MP en términos generales sin estimaciones del impacto sobre las emisiones.

2.3.1 Fuentes de Punto

Las emisiones de materia particulada proveniente de la combinación fuentes de servicios públicos, industriales y comerciales/institucionales son pequeñas en comparación a las emisiones provenientes de las fuentes de combustión de zona. Esto es debido a tanto condiciones superiores de combustión, las cuales resultan en mayores eficiencias de combustión, como también de los controles de adición para MP para la combustión de carbón y algunas fuentes de combustión de aceite. Las combustiones de servicios públicos, industrial y comercial/institucional fueron las fuentes de punto más significantes de MP₁₀ y MP_{2.5} en 1990. Otras fuentes industriales significantes incluyeron el procesamiento de metales, de productos minerales y de productos de madera.²

2.3.2 Fuentes de Zona

Las emisiones fugitivas provenientes de la agricultura, los caminos pavimentados, los caminos de terracería y las actividades de construcción representan una porción principal de las emisiones de MP₁₀ y MP_{2.5}. Sin embargo, tal como se indicó anteriormente, estas emisiones parecen estar sobreestimadas al reconciliarlas a las mediciones ambientales de los componentes de la MP_{2.5} relacionados son los minerales. Además de estas fuentes de emisiones fugitivas de polvo, las categorías de combustión de las fuentes de zona incluyendo la quema de madera, los incendios de malezas, y la quema prescrita de los residuos forestales fueron fuentes importantes. Los vehículos de carretera, los motores que no son de camino y la quema al abierto de basuras también aportaron contribuciones

significantes.²

2.4 CHARACTERIZACIÓN de CONCENTRACIONES de MP_{2.5}

Las muestras ambientales de MP_{2.5} proveniente de ocho estudios de investigación se resumen en las Figuras 1 y 2. from eight research studies are summarized in Figures 1 y 2.^{4,5} Las muestras de MP_{2.5} fueron analizadas químicamente para determinar las cantidades de sulfato de amonio, nitrato de amonio, carbón y la tierra presente. El sulfato de amonio y el nitrato de amonio son partículas secundarias formadas en la atmósfera a partir de la reacción del amoníaco con el bióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente. El carbón y la tierra son las partículas primarias. Estas son emitidas directamente hacia la atmósfera, o generadas por procesos tales como la erosión por el viento, la construcción, o el tráfico en caminos pavimentados o de terracería. Los resultados de estos análisis para los estados orientales de los Estados Unidos se muestran en la figura 1. La figura 2 resume los resultados para los estados occidentales.

La figura 1 indica que en los estados orientales, la MP_{2.5} permaneció dominada por el sulfato de amonio el que fue responsable del 40 al 60 por ciento de la masa total. Las partículas de nitrato de amonio contriubuyeron en un 5 a 15 por ciento adicional. Las partículas de carbón, proveniente de fuentes tales como la combustión incompleta, fueron responsables del 30 al 40 por ciento de la masa de MP_{2.5}. La fracción de tierra en las muestras de occidente varió en un rango del 5 al 10 por ciento.⁵

La figura 2 muestra que sólo del 5 al 15 de la MP_{2.5} fue sulfato de amonio, y el nitrato de amonio explica del 1 al 35 por ciento de la masa total. El porcentaje de carbón proveniente de la combustión incompleta varió en un rango del 5 al 15 por ciento de la masa total de MP_{2.5}.⁵

Las siguientes secciones de este documento tatan sobre las técnicas para reducir las emisiones de partículas primaria provenientes de fuentes de combustión estacionarias y de procesos industriales. Tal como se ilustró anteriormente, las partículas secundarias (el sulfato de amonio y el nitrato de amonio) comprenden un gran porcentaje de las muestras de MP_{2.5} tanto en los estados orientales como occidentales de los Estados Unidos. Esto es indicativo de la neceidad de dirigirse hacia las emisiones de bióxico de azufre, los óxidos de nitrógeno y el amoníaco al considerar los medios para reducir las concentraciones de MP_{2.5} en el futuro.

Traducciones para la Figura 1:

PM_{2.5} Composition in the Eastern Unites States

/Composición de la MP_{2.5} en el este de los Estados Unidos

Carbonaceous /Carbonáceos

Nitrate / Nitrato

Soil /Tierra

Surface / Superficie

Others / Otros

Urban location /Localidad urbana

Nonurban location / Localidad no urbana

Boundary Waters / Aguas Confines

New England average / Promedio de New England

Appalachian and Mid-Atlantic / De los Apalaches y del Atlántico Medio

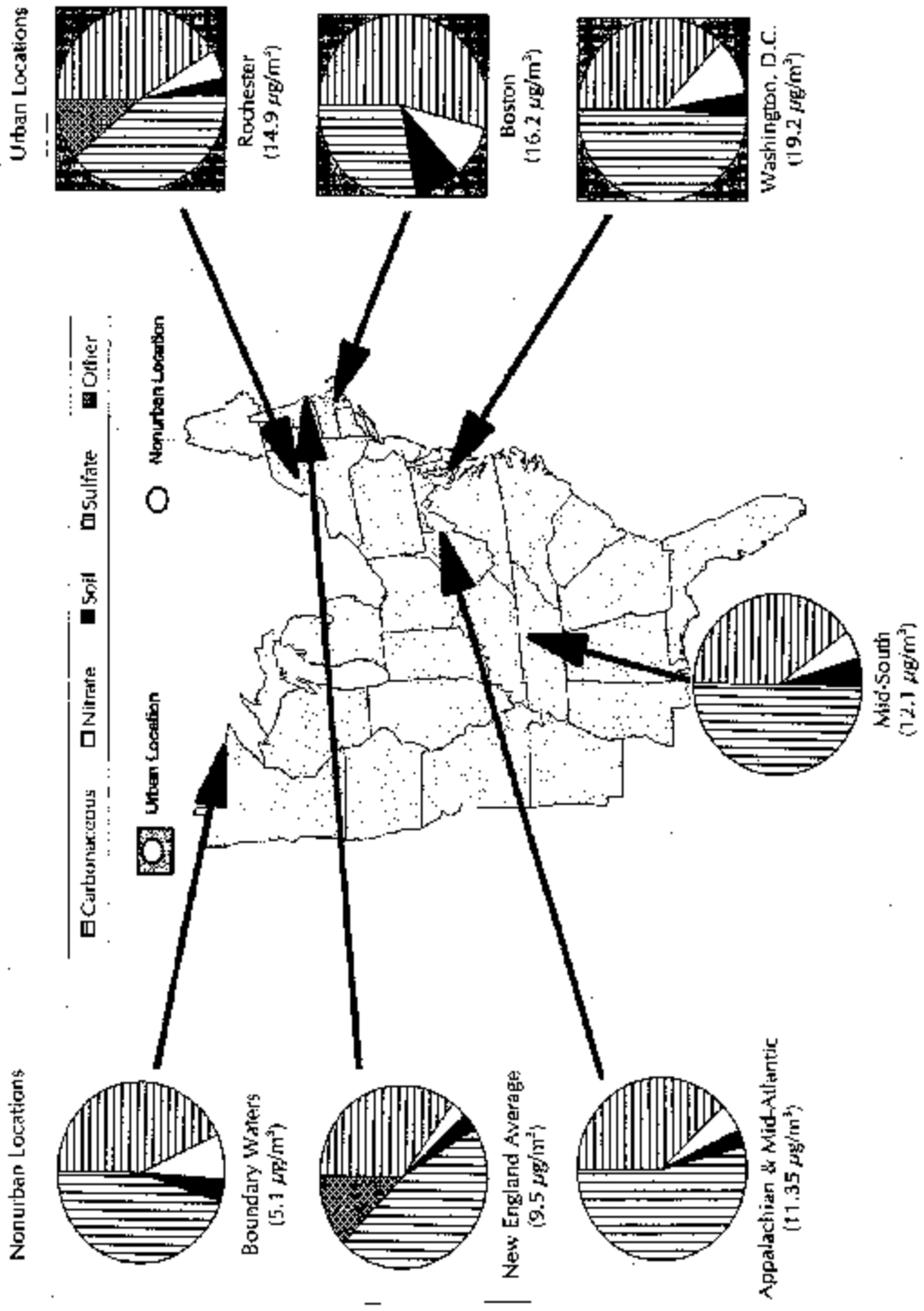
Mid-South / Sur Medio

Note.1: PM_{2.5} concentrations are determined on at least one year of monitoring at each location using a variety of non-Federal reference methods. They should not be used to determina compliance with the PM_{2.5} NAAQS.

Nota.1: Las concentraciones de MP_{2.5} son determinadas por lo menos un año de monitoreo en cada localidad usando una variedad de métodos de referencia no federales. Estas conctraciones no deben ser usadas para determinar el cumplimiento con las normas NAAQS para la MP_{2.5}.

Nota.2 Veá **Figura 1** en la página siguiente

Figure 1. PM_{2.5} Composition in the Eastern United States



Note: PM_{2.5} mass concentrations are determined on at least one year of monitoring at each location using a variety of non-Federal reference methods. They should not be used to determine compliance with the PM_{2.5} NAAQS.

Traducciones para la figura 2:

PM_{2.5} Composition in the Western Unites States

= Composición de la MP_{2.5} en el oeste de los EE. UU.

Carbonaceous = Carbonáceos

Nitrate / Nitrato

Soil / Tierra

Surface / Superficie

Others / Otros

Urban location / Localidad urbana

Nonurban location / Localidad no urbana

Boundary Waters / Aguas de Límite

South Coast / Costa sur

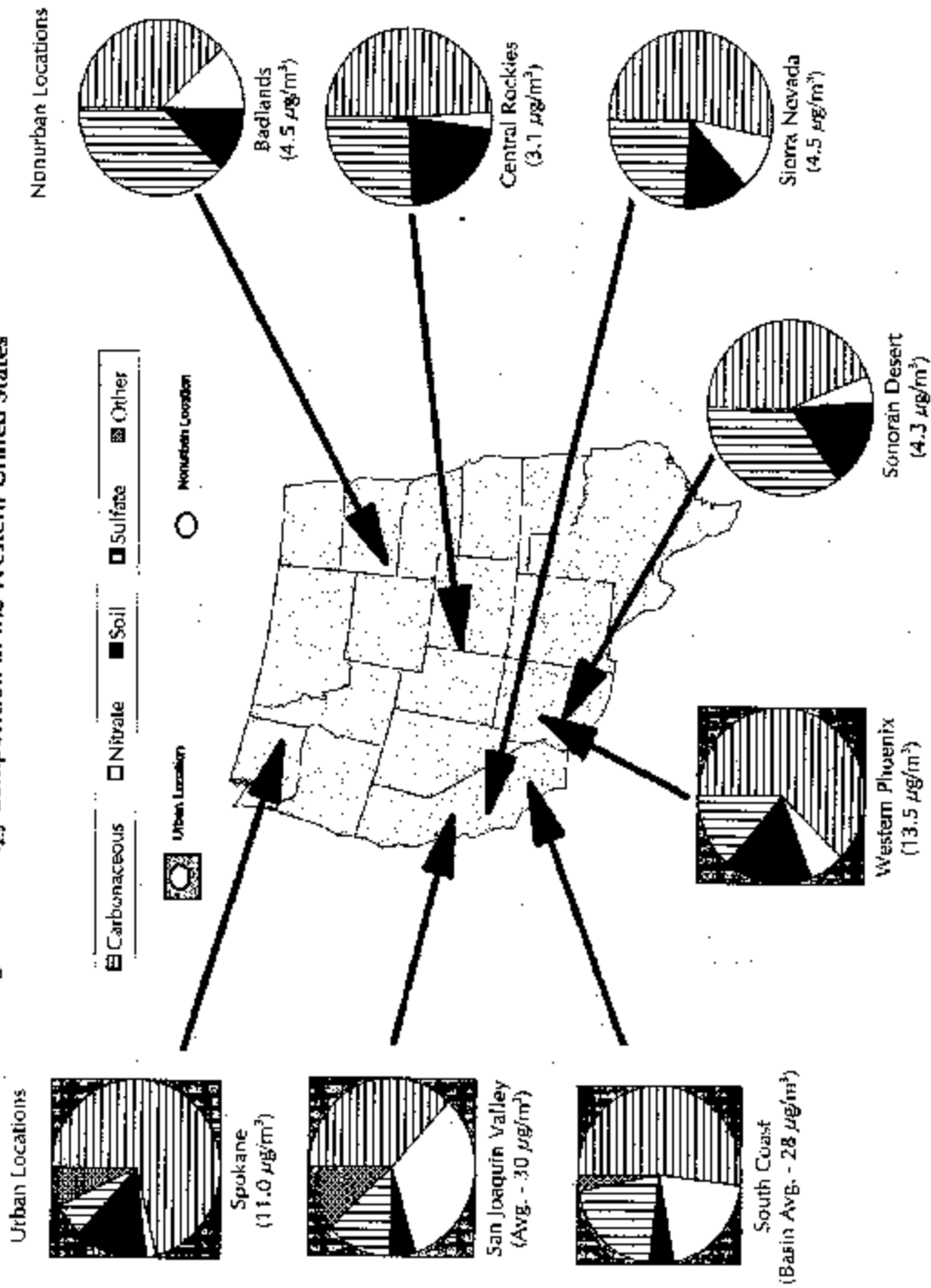
Western Phoenix / Phoenix oriental

Sonoran Desert / Desierto sonorense

Nota.1: Las concentraciones de MP_{2.5} son determinadas por lo menos un año de monitoreo en cada localidad usando una variedad de métodos de referencia no federales. Estas conctraciones no deben ser usadas para determinar el cumplimiento con las normas *NAAQS* para la MP_{2.5}.

Nota.2: Vea **Figura 1** en la página siguiente

Figure 2. PM_{2.5} Composition in the Western United States



Note: PM_{2.5} mass concentrations are determined on at least one year of monitoring at each location using a variety of non-Federal reference methods. They should not be used to determine compliance with the PM_{2.5} NAAQS.

2.5 REFERENCIAS PARA LA SECCION 2

1. Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter: Policy Assessment of Scientific and Technical Information - External Review Draft. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1996.
2. National Air Quality and Emissions Trends Report: Report Number EPA-454/R-97-013. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January 1998.
3. Darlington, T.L., Kahlbaum, D.F., Heuss, J.M., and Wolff, G.T. *Analysis of PM_{10} Trends in the United States from 1988 through 1995*. Journal of the Air & Waste Management Association. October 1997. 1070-1078.
4. Pace, T.G. "PM_{2.5} in the Ambient Air". Proceedings on the AWMA Specialty Conference PM_{2.5} - A Fine Particle Standard. Long Beach, California. January, 1997.
5. Pace, T.G. and Kuykendal, W.B. "Planning Tools for PM_{2.5} Emission Factors and Inventories". Proceedings of the Air & Waste Management Association's 91st Annual Meeting and Exhibition. San Diego, California. June 1998.

3. MEDICIÓN

La determinación de la eficiencia de control de los dispositivos de control de MP requiere el uso de métodos para determinar las emisiones de los tubos de entrada y de salida del dispositivo de control. Esta sección discute los procedimientos tanto establecidos como innovadores que se han desarrollado para medir la masa y/o tamaño de la MP, especialmente para la MP₁₀ y la MP_{2.5}. Las técnicas para identificar y medir las especies químicas de la MP se discute de igual manera.

El método más preciso para determinar la concentración de masa de la MP es recolectar el volumen entero del gas y la MP y determinar la concentración de la masa de esta muestra. Este procedimiento es, sin embargo, factible sólo con unas pocas fuentes donde existen razones de flujo muy bajas. Se han desarrollado procedimientos para muestras de pequeñas porciones de la corriente de gas para obtener una muestra representativa de manera que se puedan realizar estimaciones de las emisiones de MP. Estos procedimientos son llamados métodos extraíbles, puesto que una porción de la corriente de gas es removida de la fuente e inspeccionada en otra parte. Otros procedimientos más novedosos están siendo usados para determinar las concentraciones de masa de la MP *in situ* (en sitio). Además, como parte de la caracterización de emisiones de MP de una fuente o dispositivo de control, la distribución de tamaños de MP puede ser requerida. Esto es especialmente cierto para las determinaciones de MP_{2.5}, puesto que los procedimientos para determinar directamente las emisiones de masa de la MP_{2.5} todavía se encuentran en desarrollo (véase la sección 3.5 a continuación).

En la medición de la MP durante los métodos extraíbles, es importante que el gas sea probado isocinéticamente para que una muestra representativa de MP entre al dispositivo de sacar una muestra. El término iso cinético se refiere a la situación en donde las líneas de la corriente de gas del gas de la fuente son conservadas dentro de la MP en la sonda para sacar una muestra, de manera que la concentración y la distribución de tamaños de la MP en la sonda para sacar una muestra son las mismas que en el conducto de efluente de la fuente. El parámetro, velocidad de gas dentro de la sonda de prueba, debe controlarse para establecer las condiciones iso cinéticas, las cuales deben ser iguales a la velocidad actual del gas. Esto es en el punto de la prueba en el conducto de escape de la fuente. Puesto que la sonda de sacar una muestra tendrá un diámetro menor que el conducto de escape de la fuente y posiblemente a una temperatura más baja, la velocidad gas real usada para extraer gas a través de la sonda de sacar una muestra para establecer una velocidad de sacar una muestra iso cinética.

La anisocinética, o la ausencia de isocinética, puede conducir a un ya sea excesivo o escaso de partículas de un cierto tamaño. Las razones de menores que la velocidad isocinética conducirán a una sobre estimación de partículas de tamaños mayores, y una mayor concentración de masa de PM actual; de manera contraria, las Razones de mayores que la isocinética conducirán a una sub estimación de las partículas menores con una menor concentración de masa de PM.

3.1 LISTA DE MÉTODOS DE PRUEBA DE LA EPA PARA MEDICIÓN DE MASA DE PM

La Tabla 3-1 enumera los métodos de prueba de la EPA aplicables a las mediciones de masa de la MP. Estos métodos se discuten más aún en la siguiente sección. Para obtener una descripción detallada de estos métodos, el boletín electrónico *Technology Transfer Network* Red de Transferencia de Tecnología de la EPA, se puede ver en <http://www.epa.gov/ttn>.

3.2 MÉTODOS DE PRUEBA DE EPA PARA MEDICIÓN DE MASA DE MP DE FUENTES ESTACIONARIAS (PUNTO)

Las siguientes secciones describen los Métodos de Prueba (*Test Methods*) de la EPA para el muestreo y análisis de la masa de MP que incluyen los métodos de medición de la MP total.

El Método de Prueba 5 de la EPA, que mide la MP total proveniente de fuentes estacionarias, es el procedimiento de prueba predominante usado para medir las emisiones de masa de MP. El tren de muestreo y los procedimientos descritos en el Método 5 también son la base para muchos otros métodos de prueba de la EPA. El tren y los procedimientos también han sido modificados y adaptados para obtener métodos de prueba que son diseñados para medir otros componentes gaseosos, tales como los compuestos semivolátiles, en gases de escape en donde es probable que la MP también exista. En algunos casos, la MP es recolectada de tal manera que se remueva el potencial para interferencia con la medición de los compuestos designados.

El Método 5 y otros métodos de medición para fuentes estacionarias descritos a continuación dependen en el uso de los Métodos de Prueba 1 a 4 de la EPA. Estos métodos describen las técnicas apropiadas para utilizarse en el del gas de escape proveniente de fuentes estacionarias, y también las técnicas usadas para obtener los datos necesarios sobre las características químicas y físicas del gas de escape los cuales se necesitan para calcular las emisiones de MP. Estos métodos de prueba auxiliares y sus variaciones se enumeran en la Tabla 3-2.

3.2.1 Método de Prueba 5 de EPA para Masa Total de MP

Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de masa de MP de fuentes estacionarias. La materia particulada (MP) es removida isocinéticamente de la fuente y recolectada sobre un filtro de fibra de vidrio, mantenido a una temperatura en el rango de $120 \pm 14^{\circ}\text{C}$ u otra temperatura tal como se especifique en la regulación o sea aprobada para propósitos especiales por la EPA para la aplicación específica. La masa de MP, que incluye cualquier material que se condense a, o por encima de, la temperatura de filtración es determinada gravimétricamente después de la eliminación del agua no combinada.

Tabla 3-1. Métodos de Prueba de la EPA para la MP

Método de la EPA	Referencia del <u>Registro Federal</u>	Descripción del Método
Método 5	36 FR 24877 23/12/71	MP proveniente de fuentes estacionarias
Método 5A	47 FR 34137 30109	PM proveniente del procesamiento de asfalto y techado de asfalto
Método 5B	51 FR 42839 26/11/86	MP no de ácido sulfúrico
Método 5C	tentativo	MP proveniente de conductos pequeños
Método 5D	49 FR 43847 31/10/84	MP proveniente de filtros de tela (de presión positiva)
Método 5E	50 FR 07701 25/02/85	MP proveniente de las plantas de lana de fibra de vidrio
Método 5F	51 FR 42839 26/11/86	MP no de sulfatos
Método 5G	53 FR 05860 26/02/88	MP proveniente de calentadores de MP - túnel de dilución
Método 5H	53 FR 05860 26/02/88	PM proveniente de calentadores de madera - en la chimenea
Método 201	55 FR 14246 17/04/90	MP/MP-10 -procedimiento de reciclaje del gas de escape (RGE)
Método 201A	55 FR 14246 17/04/90	MP/MP-10 -procedimiento de la razón constante de muestras (VCM)
Método 7	43 FR 07568 23/02/78	Método de filtración de MP en la chimenea
Método 202	56 FR 65433 17/12/91	Emissiones de particulados condensables de fuentes estacionarias
Método 9	39 FR 39872 27373	Determinación visual de opacidad en la chimenea; <i>Lidar</i> remoto
Especificación de Rendimiento 1	36 FR 24877 23/12/71	MEC para opacidad en fuentes estacionarias
Método 29	59 FR 48259 20/09/94	Emissiones de metales (y MP)

Tabla 3-2. Métodos de Prueba 1 al 4 de la EPA: Procedimientos Generales para Muestreo en la Chimenea

Método de Prueba de la EPA	Descripción del Método
Método 1	Transversales de muestra y velocidad para fuentes estacionarias
Método 1A	Transversales de muestra y velocidad para fuentes estacionarias en la chimenea o conductos pequeños
Método 2	Determinación de la velocidad del gas y la razón de flujo volumétrico en la chimenea (tubo de pitot tipo S)
Método 2A	Medición directa del volumen del gas a través de tubos y ductos pequeños
Método 2B	Determinación de la razón de flujo del gas de escape de incineradores de vapor de gasolina
Método 2C	Determinación de la velocidad de gas de la torre y la razón de flujo volumétrico en las chimeneas pequeñas y ductos (tubo pitot estándar)
Método 2D	Medición de la razón flujo del gas en tubos y ductos pequeños
Método 2E	Determinación del gas de un relleno sanitario; razón de flujo de la producción de gas
Método 3	Análisis de gas para bióxido de carbono, oxígeno, aire en exceso y peso molecular en seco
Método 3A	Determinación de las concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono en emisiones de fuentes estacionarias (procedimiento por analizador instrumental)
Método 3B	Análisis de gases para la determinación del factor de corrección para la razón de emisión o gas en exceso
Método 3C	Determinación del bióxido d carbono, metano, nitrógeno y oxígeno de fuentes estacionarias
Método 4	Determinación del contenido de humedad en gases en la chimenea

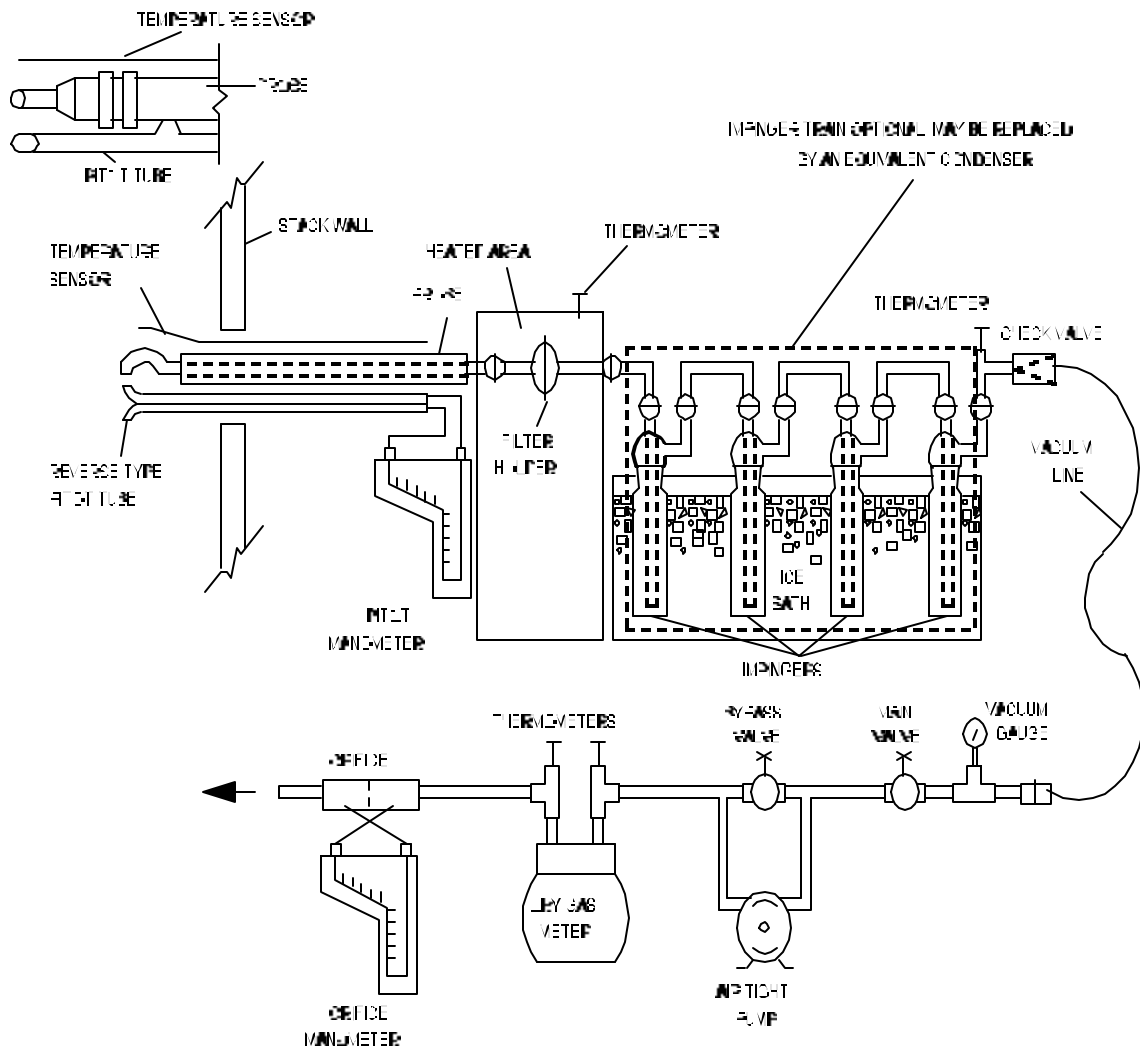


Figure 5-1. Particulate Sampling Train

Figura 3-1. Tren de Muestreo - Método de Prueba 5 de la EPA

Traducción De Términos De la Figura 3.1

Nota. Para facilitar interpretación de las traducciones de las tablas fueron hechas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo

Inglés	Español
1- Temperature sensor	Detector de temperatura
2- Probe	Sonda
3- Pitot tube	Tubo Pitot
4- Pitot manometer	Manómetro Pitot
5- <u>Inpinger</u> - train optional may be replaced by an equivalent condenser	Tren <u>repercusor</u> opcional, puede sustituirse por condensador equivalente
6- Stack wall	Pared de chimenea
7- Heated area	zona calentada
8- Filter holder	soporte del filtro
9- Thermometer	termometro
10- Ice bath	baño de hielo
11- Check valve	válvula de instrumentación
12- Reverse type pitot tube	Tubo Pitot tipo reverso
13- Vacuum line	línea al vacío
14- orifice	orificio
15- orifice manometer	manómetro de orificio
16- Dry gas meter	medidor de gas seco
17 Bypass valve	válvula de sobrepaso
18 Air tight pump	bomba sellada hermética
19 Main valve	válvula principal
20 Vacuum gauge	medidor del vacío

Un esquema tren de muestreo usado en este método se muestra en la figura 3-1. Los detalles completos de la construcción se dan en la publicación "*APTA-0581: Construction Details of Isokinetic Source-Sampling Equipment;*"¹ también se encuentran disponibles los modelos comerciales de este tren. Los cambios a partir de *APTD-0851* y las modificaciones permisibles del tren que se muestran en la figura 3-1 pueden ser obtenidas de *Emission Measurement Technical*

Information Center^a, el centro de información técnica sobre la Medición de Emisiones de la EPA. Los procedimientos de operación y mantenimiento para el tren de muestreo se describen en la publicación APTD-0576: "Maintenance, Calibration, and Operation of Isokinetic Source Sampling Equipment."² El uso correcto del tren de muestreo es importante para obtener resultados válidos con este método.

3.2.2 Variaciones del Método de Prueba 5 de EPA: 5A - 5H

Los métodos siguientes son considerados variaciones del Método 5 que enfocan a una industria específica o tipo de emisiones e MP. Los detalles específicos de cada método se resumen a continuación e incluyen las diferencias entre el método y el Método 5, y cualquier otro detalle notorio. De otra manera, los métodos son en gran parte idéntico al Método 5.

- C **Método 5A: Determinación de Emisiones de MP, Provenientes de la Industria de Procesamiento del Asfalto y el Techado de Asfalto.** Este método es similar al Método 5 excepto que en este método la captura de MP es mantenida a una temperatura ligeramente menor en el Método 5A, 42°C V.S. 120°C en el Método 5, y se utiliza un ciclón recolector.
- C **Método 5B: Determinación de las Emisiones de MP Sin Acido Sulfúrico Provenientes de Fuentes Estacionarias.** Este método es similar al Método 5 excepto que el tren de muestreo se mantiene a una temperatura mayor en el Método 5B, 160°C V.S. 120°C en el Método 5, y la muestra recolectada es calentada en el horno durante 6 horas para volatilizar cualquier rastro de ácido sulfúrico que pudiera haberse recolectado. La MP sin ácido sulfúrico se determina enseguida por el método.
- C **Método 5C: Determinación de la MP en Conductos Pequeños.** Un método de prueba para examinar las mediciones de MP en conductos pequeños se planea tentativamente; en la actualidad no existe información sobre el método.
- C **Método 5D: Determinación de Emisiones de MP proveniente de Filtros de Tela con Presión Positiva.** El Método 5D es similar al Método 5, excepto que proporciona alternativas al Método 1 en cuestión de determinar alternativas del sitio de medición, y localización y número de (transversal). Puesto que las razones de los gases de escape proveniente de los filtros de tela, con presión positiva, con frecuencia son demasiado bajos para ser medidos con exactitud con el pitot tipo S especificado en el Método 2, las determinaciones de alternativas de la velocidad se presentan en el

^a *Emission Monitoring and Analysis Division, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 27711*

Método 5D. Debido a que los cambios permisibles a la selección del sitio y la determinación de la velocidad en el Método 5D, se presentan cálculos alternativos para las concentraciones de MP con el método.

- c **Método 5E: Determinación de las Emisiones de MP; Provenientes de la Industria de Fabricación de Aislamiento, de Lana de Fibra de Vidrio.** Este método es similar al Método 5 excepto que mide tanto la MP filtrable como la condensable permitiendo la determinación de la MP total. Se usa una solución absorbible en un percusor para coleccionar el PM condensado.
- c **El Método 5F: Determinación de Emisiones de MP Sin Sulfato Provenientes de Fuentes Estacionarias.** Este método es similar al Método 5 excepto que el tren de muestreo es mantenido a una temperatura más alta en el Método 5F, 160°C V.S. 120°C en el Método 5, y la muestra recolectada es extraída con agua para analizar el contenido de sulfato.
- c **Método 5G: Determinación de Emisiones de MP. Provenientes de Calentador de Leña en un Sitio del Túnel de Dilución.** Este método difiere sustancialmente del Método 5 en que existen diferentes trenes de especificados para el Método 5G y que la MP es sustraída de un sólo punto de un extractor recolector total y túnel de que combina el gas de escape del con el aire de dilución del ambiente. La MP se recolecta sobre dos filtros de fibra de vidrio en series, en contraste con el uso de sólo uno en el Método 5. Los filtros de fibra también son mantenidos a una temperatura mucho menor en el Método 5G, 32°C V.S. 120°C en el Método 5.
- c **Método 5H: Determinación de Emisiones Provenientes de Calentadores de Leña del sitio de una Chimenea.** Este método es más similar al Método 5 que el Método 5G, ya que el filtro es mantenido a 120°C. Aunque se usa un tren con filtro doble, tal como en el Método 5G, los dos filtros se encuentran separados por *impingers* (aparatos para separar flujo de gas de partículas o gotas por inercia).

3.2.3 Métodos de Prueba de EPA para MP₁₀ de Fuentes Estacionarias

A continuación se presentan dos métodos para medir las emisiones de MP₁₀ provenientes de fuentes estacionarias. Ambos métodos son procedimientos de la chimenea; un método usa la recirculación del gas de escape y el otro es constante. Puesto que las emisiones condensables no recolectadas por estos métodos también son MP₁₀ que contribuye a los niveles de MP₁₀ del ambiente, la EPA sugiere que las mediciones de MP₁₀ de la fuente incluyan tanto los métodos para MP₁₀ en la Chimenea, tales como el método 201 o 201A, como las mediciones de emisiones condensables para establecer las contribuciones de la fuente a los niveles ambientales de MP₁₀, como aquéllos para propósitos de inventario de emisiones. Las emisiones condensables pueden ser medidas mediante un

análisis con repercusor en combinación con el Método 201 y 201A, o por el Método 202. El Método 202 se discute a continuación en la sección 3.2.5

3.2.3.1 Método 201: Determinación de Emisiones de MP₁₀. Procedimiento de Recuperación de Gas de Escape

El método 201 se aplica a la medición de las emisiones de MP₁₀ en la chimenea. En el Método 201, una muestra de gas es extraída cinéticamente de la fuente. Se utiliza un ciclón en la chimenea para separar la MP mayor de MP₁₀. Para mantener las condiciones de velocidad de flujo isocinética en la punta de la sonda y una velocidad de flujo constante a través del ciclón, una porción limpia y seca del gas de muestra a la temperatura de en la chimenea es reciclada hacia dentro de la boquilla. A continuación, la masa de particulado es determinada gravimétricamente después de la eliminación del agua no combinada. Se puede obtener una mayor información sobre este método en el documento de la EPA, *Application Guide for Source PM₁₀ Measurement with Exhaust Gas Recycle Sampling System*.³

3.2.3.2 Métodos 201A: Determinación de Emisiones de MP₁₀. Procedimiento de Razón Constante de Muestreo

El Método 201A, es una variación del Método 201, y puede ser usado para los mismos propósitos que el Método 201. En el Método 201A, una muestra de gas es extraída a una razón constante de flujo, a través de un dispositivo medidor de tamaños en la chimenea, el cual separa la MP mayor que la MP₁₀, conectado a un tren de muestreo de MP. El dispositivo medidor de tamaños puede ser ya sea un ciclón que cumple las especificaciones del método o un impactor de cascada que se han calibrado usando un procedimiento especificado. Las variaciones a partir de las condiciones isocinética de son mantenidas en el tren de muestreo dentro de límites bien definidos. Con la excepción del dispositivo medidor de tamaños y un filtro en la chimenea, este tren es el mismo que en el tren de muestreo del Método 17 de la EPA. A continuación la masa de particulado recolectada con el tren de muestreo es determinada gravimétricamente después de la eliminación de agua no combinada. Se puede obtener mayor información sobre este método en el documento de la EPA, *Application Guide for Source PM₁₀ Measurement with Constant Sampling Rate*.⁴

3.2.4 Método de Prueba 17 de EPA: Determinación de Emisiones de MP, de Fuentes Estacionarias - Método de Filtración dentro de la Chimenea

Este método describe un método de muestreo en la chimenea que puede ser usado en situaciones en donde las concentraciones de MP no son influenciadas por temperaturas en la chimenea, sobre el rango normal de temperaturas asociadas con la categoría de la fuente. Por lo tanto, el Método 17 elimina el uso de la sonda de vidrio y el soporte del filtro calentados como se requiere en el Método 5 “fuera de la chimenea”, lo cual es voluminoso y requiere una operación cautelosa por operadores entrenados de manera general. El Método 17 puede ser usado solamente para llenar los requisitos de

la *EPA* cuando es especificado por un estándar de la *EPA*, y usado sólo dentro del rango de temperatura en la chimenea también especificado por la *EPA*. El Método 17 es especialmente no aplicable a las corrientes de gas que contienen gotas de líquido o que están saturadas con vapor de agua. Además, el Método 17 no debe ser usado si la superficie proyectada de la sección transversal de ensamble de sonda y soporte del filtro cubre más del 5 por ciento de la superficie de la sección transversal.

3.2.5 Método 202 para Medición de MP Condensable

Este método se aplica a la determinación de las emisiones de materia particulada condensable (MPC) proveniente de fuentes estacionarias. Se tiene la intención de representar la materia condensable como material que se condensa después de pasar a través de un filtro. En el Método 202, la MP condensable es recolectada, en la parte del percusor, en un tren de muestreo del tipo del Método 17. Los contenidos del percusor son inmediatamente depurados o purgados después de deshacerse de los gases disueltos con gas nitrógeno para remover el bióxido de azufre del contenido del percusor. La solución absorbidora del percusor es extraída con cloruro de metileno. Las fracciones orgánicas y acuosas son reducidas hasta sequedad y los residuos son pesados. El total de ambas fracciones representa la MP condensable.

Existela posibilidad con este método de una baja eficiencia de recolección en calderas calentadas con aceite. Para mejorar la eficiencia de recolección en estas fuentes, se debe colocar un filtro adicional entre el segundo y el tercer percusor. En fuentes que usan inyecciones de amoníaco (NH_3) como una técnica de control para el cloruro de hidrógeno (HCl gaseoso), el NH_3 puede interferir con la determinación de MP condensable por el Método 202, al reaccionar con el HCl en la corriente de gas para formar cloruro de amoníaco, que es medido a continuación como MP condensable. El método describe medidas que pueden tomarse para corregir esta interferencia.

La trampa del filtro de este método puede ser analizada de acuerdo al método apropiado para determinar tamaño y composición la MP. El Método 202 también puede ser usado en conjunto con los métodos designados para medir la MP_{10} (Método 201 o 201A) si las sondas están recubiertas de vidrio. Si el Método 202 es usado en conjunto con el Método 201 o 201A, la configuración del tren de muestreo y el análisis especificado en el Método 202 debe ser usado, en conjunto con una operación de tren de muestreo, y recuperación al frente y análisis conducido de acuerdo al Método 201 o 201A. El Método 202 también puede ser modificado para medir el material que se condensa a otras temperaturas especificando la temperatura del filtro y de la sonda. Un filtro calentado y fuera de la chimenea del Método 5 puede ser usado en vez de un filtro en la chimenea para determinar las emisiones condensables en las fuentes en húmedo.

Los siguientes documentos discuten la medición de la MP condensable y los desarrollos de este método con mayor detalle: *Measurement of Condensable Vapor Contribution to PM_{10} Emissions*,⁵

A Review of Current Methods for Measuring Particulate Matter Including Condensibles from Stationary Sources,⁶ y Method Development and Evaluation of Draft Protocol for Measurement of Condensable Particulate Emissions.⁷

3.2.6 Método de Prueba 9 de EPA: Determinación Visual de Opacidad de Emisiones de Fuentes Estacionarias, - Método Alterno 1 para Uso Remoto de *Lidar*

Este método implica la determinación de la opacidad de la pluma por observadores calificados que están entrenados y certificados según los procedimientos descritos en el método. El Método 9 describe los procedimientos que serán usados por estos observadores para determinar la opacidad de la pluma en el campo. El método también incluye los criterios de ejecución que son aplicables a las variables del método las cuales, a menos que sean controladas, pueden ejercer una influencia significativa sobre la apariencia de la pluma al observador.

Del Método Alterno 1 al Método 9 proporciona la determinación remota de opacidad que usa un sistema *Lidar* (luz de radar láser para detección y rango) que emplea un rubí láser (rojo). El *Lidar* usa su propia fuente de luz y, por lo tanto, puede usarse en el día o la noche. El Método Alternativo incluye el diseño, la calibración y los procedimientos para la evaluación del rendimiento para el sistema *Lidar*. El método es aplicable a un sistema de *Lidar* estacionario o móvil.

3.2.7 Especificaciones de Rendimiento para Sistemas de Monitoreo de Emisiones Continuo (MEC) Usados para Controlar la Opacidad

La EPA ha publicado las especificaciones de rendimiento (*PS 1*) para el uso de *MEC* para controlar la opacidad en fuentes estacionarias nuevas (*40 CFR 60*, Apéndice B). Esta especificación de rendimiento se aplica a los monitores de opacidad instalados después del 30 de marzo de 1996. El MEC controla el PM usando los principios de la transmisometría de la luz. La luz tiene características espectrales específicas es proyectada de una lámpara en el CEMS a través del gas en la chimenea. La intensidad de la luz después de atravesar el gas es atenuada (absorbida y esparcida) por el PM y entonces medida por un sensor. El porcentaje de la luz proyectada atenuada es definido como la opacidad. La transmitancia se define como lo opuesto de la opacidad, es decir, las emisiones opacas de la chimenea que atenúan toda la luz tendrán una transmitancia de cero y una opacidad de 100 por ciento, y las emisiones transparentes de la torre tendrán una transmitancia del 100 por ciento y una opacidad de cero.

Esta especificación de rendimiento establece criterios específicos de diseño para un MEC con monitor de opacidad / trans-misómetro. La especificación de rendimiento también especifica la instalación, la calibración y evaluación de los criterios para asegurar el rendimiento apropiado del MEC.

3.3 OTROS MÉTODOS DE PRUEBA PARA MEDICIÓN DE MASA DE MP DE FUENTES ESTACIONARIAS (PUNTO).

Otros métodos de prueba para la medición de la masa de MP incluyen los métodos *ASTM Method D3685/D3685M*⁸ y *ASME Power Test Code 27*.⁹ Un cristal piezoeléctrico de cuarzo se ha utilizado para medir el cambio de emisiones cuasi continua de masa de MP.¹⁰ El dispositivo mide directamente el cambio en la frecuencia eléctrica del cristal debido a la masa de MP que se va acumulando.

Eso tiene lugar

Un instrumento tribo-eléctrico ha sido desarrollado para usarse como un monitor continuo de emisiones de masa de MP por *Auburn International*, llamado MEC *Triboflow 2604*. El efecto triboeléctrico es la transferencia de carga electrostática que tiene lugar cuando dos objetos se frotan o raspan entre sí. En el MEC *Triboflow*, la carga triboeléctrica que es transferida de la MP en un ducto a una sonda de acero inoxidable es monitorizada como un flujo de corriente. Nótese que el efecto triboeléctrico es diferente de la electricidad estática, la cual es el almacenamiento en contraste a la transferencia de la carga. El MEC *Triboflow* es adecuado para el Controlar de las emisiones de masa de MP, de una fuente de nivel relativamente bajo, tal como a la salida de un dispositivo de control de MP de alta eficiencia.¹¹

El uso de los MEC para la medición de masa de MP se encuentra bajo investigación en la actualidad por Office of Research and Development, la Oficina de Investigación y Desarrollo de la *EPA*. Una Guía para la Aplicación de la *EPA* para la medición de masa de MP_{2.5} también se encuentra en desarrollo, pero todavía no se ha validado.¹²

3.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE MP FUGITIVA

A continuación se presentan las descripciones breves de ocho métodos que se encuentran a disposición para medir la MP₁₀ proveniente de fuentes de polvo fugitivo. Estos métodos se describen en detalle en el documento de la *EPA: A Review of Methods for Measuring Fugitive PM-10 Emission Rates*.¹³ Algunos de estos métodos han estado disponibles durante un largo tiempo mientras que otros se han desarrollado recientemente. Muchos no son usados con frecuencia y/o fueron desarrollados con otros propósitos (por ejemplo, el estudio científico del suelo). Muchos frecuentemente no se usan y/o ellos se desarrollaron para otros propósitos (por ejemplo, ciencia de la tierra). Algunos de estos métodos han estado durante mucho tiempo disponible mientras otros se han desarrollado recientemente. Se ha desarrollado una guía¹⁴ para seleccionar el método más apropiado para un tipo de fuente determinada y se puede encontrar como un apéndice en el documento de revista de la *EPA* (referencia 13). Otro documento que discute muchos de los métodos descritos a continuación es *Techniques and Equipment for Measuring Inhalable Particulate Fugitive Emissions*.¹⁵

A continuación se dan las referencias a otros documentos que discuten los métodos individuales con la descripción de cada método. Debido a que muchos de estos métodos fueron desarrollados antes de que la MP₁₀ fuera una preocupación, algunos de los manuales de métodos a los que se hace

referencia aquí describen sólo la medición de la MP suspendida total. Por lo tanto, aunque estos documentos anteriores contienen una cantidad sustancial de información valiosa, el equipo descrito para usarse en los métodos con probabilidad habrá caducado. Se dan referencias a documentos más actualizados si se encuentran disponibles.

- C** **Método Cuasi chimenea.** Este método consiste en encerrar o cubrir bajo una campana extractora a la fuente de polvo fugitivo, en una base ya sea permanente o temporal, con el uso de un ventilador y después tomar muestras del gas de escape de manera isocinética usando los Métodos de Prueba 201 o 201A de la *EPA*. Se considera que este método sea potencialmente el más exacto porque la pluma es capturada y medida cerca a la fuente. Deben tomarse precauciones, sin embargo, para no generar emisiones de la fuente artificialmente con el equipo de sacar una muestra. Se puede obtener información adicional sobre este método en el manual *Technical Manual for the Measurement of Fugitive Emissions: Quasi-Stack Sampling Method*.¹⁶ Un equipo más actualizado se describe en los manuales *Technical Manual: Hood System Capture of Process Fugitive Emissions*¹⁷ y *Evaluation of an Air Curtain Hooding System for a Primary Copper Converter, Volume I*.¹⁸
- C** **Método con Monitor de Techo.**¹⁹ Este método puede ser el mejor medio para medir la MP fugitiva cuando se localiza un número de procesos dentro de un edificio. La MP se mide desde todas las aperturas en el edificio y la velocidad de las emisiones fugitivas totales es la suma de las razones de emisión de todas las aperturas. Este método implica la medición de la concentración de MP_{10} (con el Método de Prueba 201 o 201A de la *EPA*) en el gas de escape del ducto, la cual a su vez es multiplicada por la velocidad de salida del aire y la superficie de la sección transversal para Obtener la velocidad de emisión. Puesto que la concentración de polvo puede variar a través de la apertura del conducto, se deben tomar muestras de un número de sitios a lo largo de cada ducto, tal como en el caso de las pruebas en la chimenea (Método de Prueba 1 de la *EPA*). Si el muestreo se realiza en efecto en una rejilla de ventilación del techo, se recomienda que el muestreo se realice de acuerdo al Método 5D de la *EPA*.

En el caso de que el isocinéticamente no sea factible debido a la variación en la velocidad del aire en las aperturas, las técnicas de medición de MP_{10} pueden ser usadas. Los probadores del ambiente que han llenado los criterios de la *EPA* se describen en "*List of Designated Reference and Equivalent Methods*", la "Lista de Métodos de Referencia y Equivalentes Designados" publicada por *Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory*, el Laboratorio de Investigación

Atmosférica y Evaluación de Exposición^b de la EPA. La referencia 13 contiene la lista a la fecha del 8 de febrero de 1993.

- C **Método Viento Abajo / Viento Arriba.**²⁰ En este método, las concentraciones ambientales de MP₁₀ son medidas viento arriba / viento abajo de una fuente de polvo. La diferencia entre las dos concentraciones es considerada como la concentración de MP₁₀ debida a la fuente de emisiones fugitivas. Usando la velocidad del viento, la dirección y otros datos meteorológicos obtenidos durante el período de muestreo, la razón de emisión se determina usando modelos de dispersión. El modelo "*Industrial Source Complex*", "Complejo de Fuentes Industriales" de la EPA está siendo revisado para desarrollar un término de deposición mejorado para hacerlo más exacto para su uso con la MP.

Mientras el método viento abajo / viento arriba es considerado como el más versátil de los métodos de medición de emisiones fugitivas, también se ha considerado como el menos exacto, puesto que solamente una pequeña porción de la pluma diluida en gran parte es hecha un muestreo. Sin embargo, los estudios recientes han descubierto que la razón de las emisiones fugitivas estimadas usando el método viento arriba / viento abajo se encuentran dentro de un factor del dos por ciento del tiempo que con el método cuasi torre.²¹

- C **Método por Perfil de Exposición.**²² Este método consiste en usar un número de muestre adores del ambiente (típicamente 4 ó 5) a varias alturas a lo largo de una torre vertical (de 4 a 10 metros de altura) equipada con boquillas y ajustes a la velocidad de flujo para hacer un muestreo la pluma de emisiones fugitivas de manera isocinética. La chimenea también está equipada, para medir la velocidad y la dirección del aire. Las torres están colocadas viento abajo de la fuente, con muestre adores del ambiente (1 a 4) colocados también viento arriba de la fuente para determinar la concentración de fondo de la MP. La información sobre el ambiente obtenida de estos muestre adores se usa para determinar el flujo de masa total de polvo emitido de la fuente; ésto se lleva a cabo, mediante la integración de los valores de exposición al polvo obtenido de los diversos puntos.²³

El Método por Perfil de Exposición es restringido principalmente en situaciones en donde es posible el muestreo cerca de la fuente, excepto en donde se usan las extensiones hacia las torres.²⁴ Sin embargo, aún con estas extensiones, el método que

b

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory, Methods Research and Development Division (MD-77), Agencia de Protección Ambiental en EE.UU., Oficina de Investigación y Desarrollo, Laboratorio de Investigación Atmosférica y Evaluación de Exposición, División de Investigación y Desarrollo de Métodos (MD-77), Research Triangle Park, North Carolina. 27711. (919) 541-2622 or 4599.

usa el perfilación de las exposiciones puede ser impráctico para hacer un muestreo las fuentes con una superficie grande. Pueden ocurrir pérdidas de MP_{10} si la fuente se encuentra cercana al suelo, pero como este polvo no se suspendería en el aire contribuyendo a las emisiones, la medición de estas “emisiones relevantes” es posiblemente justo tan deseable como las emisiones reales de la fuente.¹³ El método por perfil de exposición se considera más exacto que el método viento arriba / viento abajo y se considera comparable al método con monitor en el techo¹³ y se considera apropiada para los caminos.¹³

- C **Método con Túnel de Viento Portátil.** Este método se aplica solamente a las emisiones fugitivas generadas por el viento. Fue desarrollado en los años setenta para estudiar los efectos de la arena soplada por el viento sobre la vegetación y para cuantificar las fuentes de erosión por el viento. Desde entonces ha sido usado para cuantificar las emisiones generadas por el viento provenientes de suelos expuestos y pilas de almacenamiento de carbón.^{25,26,27} El túnel portátil de viento consiste en un dispositivo con forma de aspiradora, cuya boca se coloca directamente sobre la superficie a ser hecha un muestreo usando un sello a prueba de aire. Un ventilador aspira aire a través de la boca del túnel, a través de un tubo largo hacia una sección elevada de ducto en donde puede realizarse el de la MP. El puede ser realizado usando el Método 201 o 201A. La velocidad de emisión del polvo fugitivo es igual a la concentración de partícula multiplicada por la velocidad de flujo en el túnel. Sobre el suelo a nivel, la velocidad del viento en la línea del centro del túnel puede ser relacionada a la velocidad del viento a 10 metros de altura.

- C **Método por Túnel de Viento de Modelo a Escala.** Este método implica la creación de un túnel de viento que se parece a la fuente o el terreno a muestrearse con el uso de, en varios casos, una recreación a escala de la fuente dentro del túnel de viento. Los parámetros tales como la turbulencia, el perfil de velocidad, el corte del viento y otras cantidades físicas tales como la humedad del aire y la aspereza del terreno se duplican generalmente dentro del túnel de viento. La ventaja de usar un túnel de viento de modelo a escala es que los parámetros individuales que afectan a las emisiones de polvo pueden ser controladas a continuación. La desventaja es que la relación entre las pruebas y las medidas de campo reales es “incierto”.

- C **Método por Rastreo.** Este método usa ya sea un gas o partículas como un rastreador para el polvo proveniente de la fuente a ser medida. Los rastreadores comunes son el hexa fluoruro de azufre (SF_6)²⁸ y los materiales o recubrimientos fluorescentes o fosforescentes. La suposición es que la pluma del rastreador se asemejará fuertemente a la pluma de polvo si el rastreador es liberado en el mismo lugar y al mismo tiempo que el polvo. Las mediciones viento abajo de las concentraciones del rastreador y del polvo se usan para cuantificar la velocidad de

emisión del polvo (viento arriba) mediante una razón directa usando la velocidad de liberación del rastreador (viento arriba) (o sea, la velocidad de emisión). Se realizó un estudio para determinar que el uso de un factor de corrección de 1.03 para calcular la velocidad e la emisión de la fuente aumenta la exactitud del método.²⁹

- c **Método por Globo.**^{30,25} Este método es una variación del método por perfil de exposición, discutido anteriormente. En el Método por Globo, se usa un globo para suspender muestra adores del ambiente, a diversas alturas en vez de la chimenea usado en el método por perfil de exposición. Este método es especialmente adecuado para el de fuentes de superficies grandes y/o fuentes a las que no se pudiera ser vecinar de cerca. El problema con el Método por Globo es que con frecuencia no se realiza isocinéticamente, ya que una vez que el globo se eleva, las boquillas no pueden ser cambiadas. Si la velocidad de flujo fija no es posible, la velocidad de flujo fija en los muestra adores también puede contribuir a la anisocinética. Sin embargo, el iso cinético es menos crítico para la medición exacta de la MP_{10} que para la MP suspendida total.³¹

3.5 ANÁLISIS DEI TAMAÑO DE PARTÍCULA

En la distribución del tamaño de una corriente de polvo de material particulado a veces se desea determinar las emisiones de una fuente o eficacia de la colección de un aparato de control de MP . Varias maneras particulares de medida están disponibles para determinar la distribución del tamaño de una corriente de material particulado las cuales incluyen los colectores de muestras en cascada, ciclones de , separadores centrífugos, y técnicas más avanzadas que utilizan los láseres. Note que los Métodos de Prueba de la EPA 201 y 201A pueden usarse directamente para determinar emisiones de PM_{10} y la eficacia de colección; sin embargo, para $MP_{2.5}$ y otros tamaños de la partícula, se necesita uno de los métodos discutido debajo para determinar emisiones o eficacia de la colección.³²

3.5.1 Instrumento Colector (de partículas suspendidas) en Cascada

Colectores de muestras en cascada es un método usado ampliamente para determinar el tamaño de las partículas que ha estado a disposición para las pruebas de las fuentes desde el inicio de los años setenta,³³ y posee una base teórica relativamente bien desarrollada.^{32,34} Los colectores de muestras recolectan partículas por repercusión inercial y utilizan una serie de placas (discos) o plataformas con perforaciones de diversos tamaños (chorros) que alteran la velocidad del gas que pasa hacia la siguiente plataforma. Las partículas de un tamaño específico o mayores impactarán cada placa, mientras que las partículas más pequeñas pasarán a través de la siguiente placa. Las placas están recubiertas de un material pegajoso (sustrato) que causa que la MP que impacta las placas sea

recolectada irreversiblemente. La selección de los sustratos para los colectores de muestras en cascada es una parte importante en el uso de los colectores de muestras.^{32,35}

Los colectores de muestras en cascada pueden determinar por lo general los tamaños de las partículas entre 0.3 y 16 μm ,³² con colectores de muestras a baja presión disponibles comercialmente (*Pollution Control Systems Corp.*)^c Que miden partículas entre 0.02 y 10 μm ^{36,37} La limitación principal de los colectores de muestras en cascada es que sólo una cantidad pequeña de MP (generalmente menor de 10 mg) puede ser recolectada sobre cada plataforma;³² por lo tanto, el volumen / tiempo de gases debe ser ajustado para dar cabida a este límite superior. Colectores de muestras en cascada también pueden estar sujetos a una tendencia a favor de las partículas debido a la elasticidad y re encauzamiento de las partículas, y debido a la fractura de las partículas mayores durante la impactación.

La operación apropiada de los Colectores de Muestras en cascada se describe en el documento de la EPA, *Procedures for Cascade Impactor Calibration and Operation in Process Streams*.³⁸

3.5.2 Ciclones de Muestro

Los ciclones de muestreo operan de la misma manera que los ciclones usados para la recolección de MP, en que el gas con MP es forzado a girar de manera que una parte de la MP choca contra las paredes del ciclón y es recolectada. La MP por encima de un tamaño específico al ciclón será recolectada en su mayoría y las partículas por debajo de un cierto tamaño pasarán en su mayoría a través del ciclón sin ser recolectadas. Los ciclones de muestra individual sólo son capaces de determinar la masa de las partículas ya sea por encima o por debajo de un tamaño específico. Sin embargo, si se utilizan ciclones de diversos tamaños en serie, los tamaños de la MP por encima de un (relativamente amplio) rango pueden ser determinadas. Las limitaciones de los ciclones de consisten en que no son adecuados para tomar muestras de gases con concentraciones bajas de MP.³²

En el final de los años setenta, la EPA desarrolló *Source Assessment Sampling System (SASS)*, el sistema de por evaluación de la fuente, como un instrumento amplio para la evaluación de la fuente para seleccionar y eliminar la MP, los compuestos orgánicos e inorgánicos en un tren de muestreo.^{39,40} El muestreo del SASS incluía una serie de tres ciclones y un filtro de respaldo que separaba la MP en las siguientes categorías de tamaño: $>10 \mu\text{m}$, 3 a 10 μm , 1 a 3 μm , y $<1 \mu\text{m}$. Debido a que el tren de muestreo del SASS fue construido con acero inoxidable para soportar mejor las condiciones en el campo, las razones de recuperación para los análisis químicos no fueron tan altas como en los trenes de fabricados de vidrio, tales como el SW846-Método 0010 (Método 5

c Pollution Control Systems Corporation, Seattle, Washington.

Modificado) de *Office of Solid Wastes (OSW)*, la Oficina de Residuos Sólidos de la *EPA* descrito en la sección 3.6.2.⁴¹ Sin embargo, el método de la *OSW* no fracciona la MP por tamaños.

Un sistema de ciclones anidados en series también ha sido desarrollado^{42,43} y se encuentra a disposición comercialmente de vendedores, incluyendo *Sierra Instruments, Inc.*^d Los cinco ciclones tienen puntos de corte más pequeños, con valores de d_{50} reportados de 5.4, 2.1, 1.4, 0.65, y 0.32 μm

3.5.3 Medición de Distribución Tamaño en Tiempo Real

Un De terminador Aerodinámico de Tamaños de Partículas (ATP) ha sido desarrollado que puede determinar el “tiempo real” de las partículas midiendo su velocidad a medida que las partículas se aceleran a través de un orificio de la placa.⁴⁴ Las mediciones de la velocidad de las partículas son realizadas con un velocímetro Doppler de láser.^{45,46} El instrumento se encuentra disponible comercialmente de *TSI Inc.*^e

Se ha reportado que la medición *in situ* de la MP usando rayos láser ha tenido éxito con las partículas más pequeñas, menores de 1 μm .⁴⁷ El láser es usado para calentar la MP y, basándose en las razones de enfriamiento de la MP, es posible la diferenciación de tamaños. Este método tiene la ventaja de poseer un período muy corto de tiempo de medición (microsegundos), de manera que el efecto de los procesos que cambian rápidamente sobre la distribución de las partículas puede ser determinado.

Las técnicas acústicas también están siendo usadas para determinar el tamaño de la MP. Esta técnica depende de la detección y medición de las ondas elásticas que surgen del impacto de las partículas sobre una superficie, tal como una placa,⁴⁸ u otras partículas.⁴⁹ La señal acústica puede ser medida económicamente con un transductor piezoeléctrico de alta fidelidad⁴⁸ o con el uso de un micrófono sencillo.⁴⁹ Este último método es más adecuado para la MP de forma regular, mientras que el primero no se recomienda para las corrientes de partículas con una concentración de alto número ($>10^9$ per m^3).

Un método óptico ha sido desarrollado a partir de un estudio fundado por la *EPA* por *Insittec Measurement Systems*.^f El método, conocido como “*Transform method for Extinction-Scattering with Spatial resolution*” (*TESS*), el método de transformación para la dispersión por extinción con resolución espacial”, es una técnica patentada basada en la dispersión de la luz de láser.⁵⁰ El *TESS* mide la concentración total de las partículas. LA medición es independiente de la composición y la

^d *Sierra Instruments, Inc.*, Carmel Valley, California.

^e *TSI Inc.*, St. Paul, Minnesota.

^f *Insittec Measurement Systems*, San Ramon, California.

distribución del tamaño de las partículas. La concentración de partículas se mide como una relación de la luz dispersada a la luz transmitida.

Una batería de difusión que puede ser usada en una situación de fuente ha sido desarrollada.⁵¹ Las baterías de difusión utilizan arreglos de mallas, tubos o placas que presentan una gran superficie para la deposición de partículas por difusión browniana. La materia particulada de diversos tamaños puede ser clasificada con baterías de difusión, debido a la diferencia en los coeficientes de difusión, para partículas de tamaños diferentes.^{52,53}

Se encuentran a disposición otros métodos reales de contabilidad / determinación de tamaños de partículas. Estos dispositivos incluyen a los dispositivos ópticos, contadores con núcleo de condensación y analizadores de movilidad eléctrica.^{54,55,56, 57,58,59} Algunos de estos dispositivos pudieran no ser apropiados para las concentraciones de PM al nivel de la fuente y/o no pueden explicar adecuadamente el índice refractivo o la forma de las partículas.

3.5.4 Distribución de Tamaños de Muestras a Granel

La materia particulada puede ser recolectada de la fuente y ser analizada después para la distribución de tamaños de las partículas en el laboratorio usando varias técnicas disponibles. Estas técnicas deben ser usadas con cautela, sin embargo, porque la distribución original de las partículas de gas puede ser alterada por aglomeración, separación de las partículas, reacciones químicas o pérdida de sustancias volátiles que ocurre durante la recolección y almacenamiento de las muestras. Además se puede formar masa de artefacto a partir de los materiales del filtro, tales como la fibra de vidrio, que se oxidan en contacto con los gases ácidos en la muestra de aire. Por lo tanto, los resultados de la distribución de tamaños obtenidos con estos métodos tienen significado sólo si los efectos de la recolección y almacenamiento de las muestras son insignificantes o conocido con claridad.

El tamaño de las partículas de la MP recolectada sobre filtros puede ser determinado con microscopios de electrones repasadores (*scanning electron microscopes, SEM*)⁶⁰. La distribución de tamaño de volumen es estimada a partir de la distribución de tamaños determinada por el microscopio de electrones repasador. Este microscopio puede ser usado hasta para tamaños de hasta 0.01 μm ⁶¹

Otro dispositivo usado para la determinación de tamaños de las partículas estimula eléctricamente a las partículas que son re suspendidas en un fluido conductivo. La amplitud del pulso eléctrico generado por cada partícula es medida a medida que las partículas pasan individualmente a través de un orificio o apertura. Debido a que el pulso eléctrico es proporcional al volumen de las partículas, el diámetro de las partículas puede ser estimado suponiendo que la partícula es de forma

esférica. Los instrumentos tales como el contador *Coulter*^g 62 y el *Elzone*^h *Electrozone* 63 se encuentran a disposición comercialmente para proporcionar este tipo de análisis.^{64,65} Estos dispositivos pueden proporcionar el análisis de partículas con tamaños >20 µm y tan bajos como de 0.35µm⁶²

Un *Bahco Micro-Particle Classifier*, un clasificador de micro partículas *Bahco*, es el dispositivo para la determinación de tamaños de partículas recomendadas por Industrial Gas Cleaning Instituteⁱ para determinar el tamaño de las partículas y la eficiencia de recolección de los recolectores mecánicos, para partículas de 1 hasta por encima de 20 µm de diámetro. Los procedimientos para la calibración del *Bahco* se encuentran en la referencia *American Society of Mechanical Engineers Power Test Code 28*⁹ que describe los procedimientos a ser usados para determinar el tamaño de la MP fina que se encuentra en el polvo y el humo. El *Bahco* es uno de una clase de instrumentos llamados clasificadores centrífugos, que en efecto determinan la distribución de velocidad terminal de la MP, la cual puede ser relacionada al tamaño de partícula usando la Ley de Stokes. En realidad, estos instrumentos determinan el diámetro de partículas esféricas sólidas equivalentes y, por lo tanto, pueden no proporcionar información útil si la MP es significativamente no esférica.

Un dispositivo de flujo laminar que atraviesa el conducto ha sido desarrollado que recolecta la MP para su análisis de tamaños posteriormente por un analizador de tamaños por difracción con láser *Malvern*.⁶⁶ Este instrumento también mide la carga eléctrica de las partículas de manera que puede ser usada para optimizar la operación del precipitador electrostático.

3.6 DETERMINACIÓN DE TAMAÑO Y COMPOSICIÓN

Los procesos extraíbles de MP, tales como el Método de Prueba 5 de la *EPA*, permiten la determinación de tamaño y composición química de la MP recolectada. La mayoría de los métodos para la determinación de tamaño y composición de la MP usan la detección espectroscópica, aunque otros procedimientos analíticos también pueden ser usados. Las secciones siguientes discuten las diversas técnicas que pueden ser usadas para determinar tamaño y composición la MP. Las descripciones de dos métodos de prueba de la *EPA* que detallan procedimientos tanto para recolectar como para analizar la MP para especies individuales también se incluyen a continuación.

3.6.1 Método de Prueba 29 de EPA para Metales y MP

En Método 29 se aplica a la determinación de las emisiones de antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), plomo (Pb), manganeso

^g *Coulter Electronics*, Hialeah, Florida.

^h *Particle Data Laboratories, Ltd.*, Elmhurst, Illinois.

ⁱ *Industrial Gas Cleaning Institute, Inc.*, Stamford, Connecticut.

(Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), fósforo (P), selenio (Se), plata (Ag), talio (Tl) y zinc (Zn) provenientes de fuentes estacionarias. Este método puede ser usado para determinar las emisiones totales de MP, además de las emisiones de metales, si los procedimientos y precauciones prescritas son acatados.

En el Método 29, una muestra de la Chimenea se extrae isocinéticamente de la fuente; las emisiones de MP son recolectadas en la sonda y sobre un filtro calentado, y las emisiones gaseosas son a su vez recolectadas en una solución ácida acuosa de peróxido de hidrógeno (analizada para todos los metales incluyendo el mercurio) y una solución ácida acuosa de permanganato de potasio (analizada sólo para el mercurio). Las muestras recuperadas son digeridas, y fracciones apropiadas son analizadas para el mercurio, por medio de la espectroscopia, por absorción atómica de vapor en frío (EAAVF) y para Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, P, Se, Ag, Tl y Zn por espectroscopia de emisión de plasma de argón acoplada inductivamente (PAAI) o espectroscopia por absorción atómica (EAA). El hierro (Fe) puede ser una interferencia espectral durante el análisis de As, Cr, and Cd por PAAI. El aluminio (Al) puede ser una interferencia durante el análisis de As and Pb por PAAI.

La espectroscopia por absorción atómica con horno de grafito (EAAHG) se usa para el análisis de Sb, As, Cd, Co, Pb, Se y Tl si estos elementos requieren una mayor sensibilidad la que puede ser obtenida por PAAI. Si se desea, se puede usar la EAA para el análisis de todos los metales enumerados si los límites de detección resultantes del método en la chimenea cumplen los requisitos del programa de pruebas. De manera similar, la espectroscopia de masa de plasma acoplado inductivamente (PAI-EM) puede usarse para el análisis de Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, As, Tl y Zn.

El método 29 se discute en mayor detalle en el documento de la EPA, *Multiple Metals Stack Emissions Measurement Methodology*.⁶⁷ El Método 29 es prácticamente idéntico a los otros dos métodos de la EPA:

- c El método SW-848-0012⁶⁸ de la Oficina de Residuos Sólidos de la EPA, "*Methodology for the Determination of Metals Emissions from Hazardous Waste Incineration and Similar Combustion Sources*" (La metodología para la Determinación de Emisiones de Metales de la Incineración de Desperdicio peligrosos y Fuentes de Combustión Similares);

- c El método de la Oficina de Residuos Sólidos de la EPA, "*Methodology for the Determination of Metals Emissions from Hazardous Waste Incineration and Similar Combustion Sources*," *That was developed for Boilers and Industrial furnaces BIF*⁶⁹ - que fue desarrollado para las calderas y hornos industriales.

3.6.2 Método 0010 (SW-846)⁴¹ EPA

Este método se usa para determinar la cantidad de constituyentes orgánicos semivolátiles en el gas de escape, tanto como para determinar la MP total, según el Método 5 de la *EPA*; he ahí el nombre de “Método 5 Modificado”. El Método de Prueba 0010 de la *OSW* puede ser usado para detectar bi fenilos poli clarinados, dibenzo dioxinas y dibenso dioxinas clarinadas, materia orgánica poli cíclica y otros compuestos orgánicos semivolátiles. El método es usado por la *OSW* para determinar la eficiencia de remoción y destrucción de los principales constituyentes orgánicos peligrosos provenientes de los incineradores de residuos.

El Método de Prueba 0010 es un Método de Prueba 5 de la *EPA*, de un tren de muestreo, modificado para incluir un filtro de alta eficiencia y un lecho compacto de XAD-2 o resina de espuma. El filtro recolecta la MP cargada de sustancias orgánicas y el lecho compacto adsorbe las especies orgánicas semivolátiles en el gas efluente. El método incluye una descripción de una variedad de análisis químicos comprensivos para determinar la identidad y concentración del material orgánica. El análisis del filtro sólo rinde información sobre la determinación de tamaño y composición de la MP.⁷⁰

3.6.3 Espectrometría

La espectrometría es una técnica común usada para determinar las especies presentes en la MP. Sin embargo, puesto que los detectores espectrométricos sólo responden a la presencia del elemento, no proporcionan información alguna sobre los compuestos químicos y , en la mayoría de los casos, no indican el estado de oxidación del elemento.

3.6.3.1 Espectrometría por Absorción Atómica

Espectrometría por absorción atómica (EAA) ⁷¹ generalmente implica algún tipo de extracción (ácida) de la sustancia siendo analizada seguida por la excitación de la solución en una flama. La luz con una longitud de onda característica del elemento de interés atraviesa la llama. La cantidad de luz absorbida es a su vez relacionada a la cantidad presente del elemento. En EAA, los elementos individuales deben ser determinados en secuencia. Así, a pesar de que cualquier elemento puede ser determinado para el cual existe una lámpara disponible para producir la luz característica, la mayoría de las muestras de MP son lo suficientemente grandes para permitir sólo una media docena de determinaciones. Algunos elementos, si están presentes en la MP, (tales como el antimonio y el arsénico), pueden requerir la aplicación de métodos especiales. La absorción atómica está sujeta a interferencias que pueden conducir a errores sustanciales. Sin embargo, si son reconocidos, estos errores por lo general pueden ser explicados o eliminados para producir buenos análisis cuantitativos.

3.6.3.2 Espectroscopia por Emisión Óptica

La espectroscopia de emisión óptica (EEO) implica la excitación de los electrones enlazados débilmente en los elementos para observar sus emisiones características a medida que ocurren sus desexcitaciones. La longitud de onda de la luz resultante es característica del elemento, y la intensidad es una indicación de la cantidad del elemento que se encuentra presente.

La técnica más deseable de EEO es la excitación del plasma por argón.⁷² La espectrometría de plasma ofrece más ventajas que la EAA, con una preparación de muestras, razones de análisis y límites de detección similares. Las técnicas de EEO pueden determinar simultáneamente hasta 50 elementos. La espectrometría de emisión óptica es, en general, más libre de interferencias que la absorción atómica.

3.6.3.3 Espectrometría de Masa

La espectrometría de masa (EM) es un campo de análisis en expansión en la actualidad, cuyo crecimiento ha sido auspiciado por la necesidad de una creciente exactitud y detección de contaminantes altamente tóxicos que se encuentran presentes en concentraciones pequeñas en el ambiente. Las interferencias espectrales con EM son importantes, pero por lo general pueden ser resueltas por el uso de un espectrómetro con alta resolución. Tal como con cualquier técnica de elementos múltiples, la exactitud de EM depende de los elementos a ser analizados y de la matriz de la muestra. La ventaja del EM es que cada elemento en la tabla periódica puede ser detectado simultáneamente, con una sensibilidad casi igual en los rangos de partes por millón (ppm) y sub-ppm. Las técnicas de EM también permiten distinguir entre los isótopos, lo cual a veces es deseable en la determinación de las relaciones de isótopos.

Dos tipos específicos de técnicas de EM aplicables a las muestras de MP son la espectrometría de masa con fuente de chispa,⁷³ y la EM con fuente de iones por láser, a veces llamada análisis de masa con micro sonda de láser (AMML).⁷⁴ Ambas técnicas usan una fuente de energía para vaporizar e ionizar parcialmente pequeñas cantidades de MP las cuales, bajo condiciones controladas especialmente, son a su vez accesible para el análisis por EM. El AMML tiene la ventaja en el hecho de que también puede determinar el tamaño y la forma de las partículas con la misma resolución que un microscopio de luz (aproximadamente 0.13 μm).

3.6.3.4 Análisis de Activación de Neutrones

El análisis por activación de neutrones (AAN) consiste en una variedad de métodos distintos, todos produciendo núcleos inestables que emiten radiación gamma.^{75,76} La energía y la intensidad de los rayos gamma son indicadores del elemento y su cantidad. Instrumental termal en AAN es el método usado más comúnmente para la MP. En este enfoque, un reactor nuclear es usado para producir núcleos inestables. El análisis por activación de neutrones puede determinar simultáneamente hasta 25 elementos en una muestra de MP.

3.6.3.5 Espectrometría Fluorescente de Rayos X

La espectrometría fluorescente de rayos X implica la excitación de electrones enlazados fuertemente y la observación de la emisión de rayos X a medida que ocurre la des excitación.^{75,77} La excitación puede realizarse por medio de una variedad de técnicas, pero el uso de un generador de rayos X es la más común. La técnica puede ser ya sea de detección dispersiva de energía de multi elementos (de quizás hasta 30 elementos) o detección dispersiva de la longitud de onda (de quizás hasta 10 elementos). Solamente los elementos con números atómicos mayores que los del magnesio pueden ser analizados. Las partículas pueden ser analizadas no destructivamente, directamente sobre un filtro. Las interferencias son comunes y la calibración puede ser un problema.

3.6.4 Métodos Electroquímicos

Los métodos electroquímicos han sido usados con ciertos límites para determinar un número pequeño de elementos en las muestras de MP. Algunos de estos métodos son: la potenciometría con electrodos selectivos de iones, la polarografía y la voltametría de remoción anódica.⁷⁵ Los métodos electroquímicos tienen pocas ventajas para el análisis de MP aparte de los bajos costos de capital iniciales para el equipo relativo a otras técnicas.

3.6.5 Métodos Químicos

Muchos procedimientos químicos en húmedo constituyen los métodos clásicos usados para el análisis de los elementos de huella de los particulados. En general, se usa un reactivo que forma algún color, y la cantidad del elemento es determinada por el grado del desarrollo del color. El más conocido de estos procedimientos tal vez sea el que se basa en el uso de di tizone (di tizona)⁷⁸ como el reactivo calorimétrico para el plomo. Los procedimientos químicos en húmedo requieren de un trabajo lento e intenso, comparado a las técnicas espectrales, particularmente ya que solamente un elemento puede ser determinado a la vez. Las interferencias también pueden ser un problema.

Los métodos para estimar la masa total del material orgánico extraíble con benceno se encuentran disponibles. En esta técnica, una porción de la captura de la mitad del frente del Método de la Prueba 5 de la EPA, es colocada en un extractor Soxhlet y refluida con benceno durante varias horas. El benceno es volatilizado enseguida y la masa de residuo es pesada.

Los métodos para identificar y determinar las especies orgánicas abunda. Estos métodos usan secuencias diferentes de extracciones que separan a los grupos de diferentes especies orgánicas basándose en su solubilidad. Las soluciones son sujetas con frecuencia a la separación cromatográfica con detección de masa espectral. Para los compuestos orgánicos que son volátiles hasta alrededor de los 300°C, puede ser usadas la cromatografía de gases -espectrometría de masa (CG-EM).⁷⁹ Para las especies orgánicas con menor volatilidad, podría ser usada. La cromatografía líquida de alto rendimiento (CLAR)⁸⁰ se usa típicamente, pero ninguno de estos procedimientos permite alto porcentaje de análisis.

Para el análisis de una especie orgánica de interés de mucho tiempo atrás, el banzo alfa pireno (BaP), ha sido usado en la cromatografía de capa fina (CCF) con detección por fluorescencia. Este procedimiento requiere una extracción con ciclo hexano, aplicación de la muestra y desarrollo de una placa de CCF, con detección por fluorescencia. Este procedimiento es más libre de interferencias que algunos métodos de CLAR y posee una mayor frecuencia de rendimiento.⁸¹

3.7 REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 3

1. Martin, R.M. Construction Details of Isokinetic Source-Sampling Equipment (APTD-0581). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. April 1971.
2. Rom, J.J. Maintenance, Calibration, and Operation of Isokinetic Source Sampling Equipment (APTD-0576). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. March 1972.
3. Application Guide for Source PM₁₀ Measurement with Exhaust Gas Recycle Sampling System (EPA/600/3-88-058). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1988.
4. Application Guide for Source PM₁₀ Measurement with Constant Sampling Rate (EPA/600/3-88-057). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1988.
5. Measurement of Condensable Vapor Contribution to PM₁₀ Emissions (EPA-600/D-89/103; NTIS PB89-224521). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. June 1985.
6. A Review of Current Methods for Measuring Particulate Matter Including Condensibles from Stationary Sources (EPA-600/3-89/020; NTIS PB89-169973). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1989.
7. Method Development and Evaluation of Draft Protocol for Measurement of Condensable Particulate Emissions (EPA-450/4-90-012; NTIS PB90-24805). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. May 1990.
8. 1995 Annual Book of Standards, Section 11: Water and Environmental Technology, Volume 11.03: Atmospheric Analyses. American Society of Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania. 1995
9. Determining the Properties of Fine Particulate Matter: Power Test Codes. American Society of Mechanical Engineers, New York, New York. 1996.

10. Fissan, H. and D.F. Schulze-Froehlich. "A New Piezoelectric Quartz Crystal for Particle Mass Determination" in Proceedings: Advances in Particle Sampling and Measurement (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615), Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
11. Tacelli, R.W., R.E. Newton, and J.M. Andrews. "Triboelectric Instrument for Use as a Continuous Particulate Emission Rate Monitor," in *Continuous Emission Monitoring: A Technology for the 90s, Proceedings of an International Specialty Conference*. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania. 1993.
12. Personal Communication. Ward, Tom, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, with Jones, Donna Lee, EC/R Inc., Durham, North Carolina. August 27, 1996.
13. A Review of Methods for Measuring Fugitive PM-10 Emission Rates (EPA/454-R-93-037; NTIS PB94-204203). Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. November 1993.
14. Protocol for the Measurement of Inhalable Particulate Fugitive Emissions from Stationary Sources. Draft report prepared under EPA Contract 68-04-3115 by TRC Environmental Consultants, Inc., Wethersfield, Connecticut, for Mr. D. Bruce Harris, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. March 1980.
15. Techniques and Equipment for Measuring Inhalable Particulate Fugitive Emissions (EPA-600/9-82-005d; NTIS PB-83-149617). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1982.
16. Technical Manual for the Measurement of Fugitive Emissions: Quasi-stack Sampling Method (EPA-600/2-76-089c). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1976.
17. Technical Manual: Hood System Capture of Process Fugitive Emissions (EPA-600/7-86-016; NTIS PB86-19044). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1986.
18. Evaluation of an Air Curtain Hooding System for a Primary Copper Converter, Volume I (EPA-600/2-84-042a; NTIS PB84-160514). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1984.
19. Technical Manual for the Measurement of Fugitive Emissions: Roof Monitor Sampling Method for Industrial Fugitive Emissions (EPA-600/2-76-089b). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1976.

20. Technical Manual for the Measurement of Fugitive Emissions: Upwind/Downwind Sampling Method for Industrial Emissions (EPA-600/2-76-089a). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1976.
21. Gengxin, H., X. Ligu, and H. Yanfeng. "A Study of Diffusion Models Applied to Dust Emissions from Industrial Complexes." Environmental Monitoring and Assessment. 22 (89-105). 1992.
22. Development of Emission Factors for Fugitive Dust Sources (EPA-450/3-74-037; NTIS PB-238262). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1974.
23. Garman, G and G.E. Muleski. Example Test Plan for Point or Nonuniform Line Sources. Prepared under EPA Contract 68-DO-0123, Work Assignment 11-44. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1993.
24. Clayton, P., S.C. Wallin, B.J. Davis, and A.C. Simmonds. Methods for Determining Particulate Fugitive Emissions from Stationary Sources (NTIS PB-85-181717). National Technical Information Service, Washington, DC. 1984.
25. Improved Emission factors for Fugitive Dust from Western Surface Coal Mining Sources (EPA-600/7-84-048; NTIS PB84-170802). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1984.
26. Cowherd, C. A New Approach to Estimating Wind-Generated Emissions from Coal Storage Piles. Air Pollution Control Association Specialty Conference Proceedings (SP-51): Fugitive Dust Issues in the Coal Use Cycle. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania. 1983.
27. Iron and Steel Plant Open Source Fugitive Emission Control Evaluation (EPA-600/2-83-110; NTIS PB84-110568). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1983.
28. On the Use of SF₆-Tracer Releases for the Determination of Fugitive Emissions (EPA-600/9-82-005d; NTIS PB83-149617). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1982.
29. Frankel, R.G. Fugitive Dust Emissions: Accuracy of Gas Tracer Determinations. Masters Report. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, North Carolina. 1995.
30. Balloon Sampling to Characterize Particle Emissions from Fugitive Sources (EPA-600/9-82-005d; NTIS PB83-149617). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1982.

31. Davies, C.N. The Entry of Aerosols in Sampling Heads and Tubes. *British Journal of Applied Physics*. 2:291. 1968.
32. Shendrikar, A.D. and D.S. Ensor. "Sampling and Measurement of Trace Element Emissions from Particulate Control Devices," in *Toxic Metals in the Atmosphere*, J.O. Nriagu and C.I. Davidson, Eds. John Wiley and Sons, New York, New York. 1986.
33. Pilat, M.J. D. S. Ensor, and J.C. Bosch. Source Test Cascade Impactor. *Atmospheric Environment*. 4:671-679. 1970.
34. Marple, V.A. and B.Y.H. Liu. Characteristics of Laminar Jet Impactors. *Environmental Science and Technology*. 8:648. 1974.
35. Felix, L.G., G.I. Clinard, G.E. Lacey, and J.D. McCain. Inertial Cascade Impactor Substrate Media for Flue Gas Sampling (EPA-600/7-77-060). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. 1977.
36. Pilat, M.J. G.A. Raemhild, E.B. Powell, G.M. Fiorette, and D.F. Meyer. Development of Cascade Impactor System for Sampling 0.02 to 20-micron Diameter Particles (FP-844, Volume 1). University of Seattle, Seattle Washington. 1978.
37. Nelson, P.A., D.S. Mummey, and W.D. Snowden. "Ultra-Fine Cascade Impactor Particle Size Data Relationships to Opacity: Case Histories" in *Proceedings: Advances in Particle Sampling and Measurement* (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615), Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
38. Procedures for Cascade Impactor Calibration and Operation in Process Streams (EPA-600/2-77-004). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. 1977.
39. Source Assessment Sampling System: Design and Development (EPA-600/7-78-018). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. February 1978.
40. Merrill, R.G., J. Lewtas, and R.E. Hall. "Source Assessment Sampling System (SASS) Versus Dilution Tunnel Sampling," in *Proceedings: Advances in Particle Sampling and Measurement* (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615), Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
41. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Third Edition. Report No. SW-848. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. 1986.
42. Smith. W.B. and R.R. Wilson. Development and Laboratory Evaluation of a Five-Stage Cyclone System (EPA-600/7-78-008). U.S. Environmental Protection Agency, Research

- Triangle Park, North Carolina. 1978.
43. Smith, W.B. and R.R. Wilson. A Five-Stage Cyclone System for In Situ Sampling. *Environmental Science and Technology*. 13(11). November 1979.
 44. Agarwal, J.K. and R.J. Remiarz. "Development of an Aerodynamic Particle Sizer" in *Proceedings: Advances in Particle Sampling and Measurement (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615)*, Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
 45. J.C. Wilson and B.Y.H. Liu. Aerodynamic Particle Size Measurement by Laser-Doppler Velocimetry. *J. Aerosol Science*. 11:139-150. 1980.
 46. Agarwal, J.K. and L.M. Fingerson. Real-Time Aerodynamic Particle Size Measurement with a Laser Velocimeter. *TSI Quarterly*. V(1). 1979.
 47. Roth, P. and V. Filippov. In Situ Ultrafine Particle Sizing by a Combination of Pulsed Laser Heatup and Particle Thermal Emission. *J. Aerosol Science*. 27(1):95-104. 1996.
 48. Buttle, D.J., S.R. Martin, and C.B. Scruby. Particle Sizing by Quantitative Acoustic Emission. *Research in Nondestructive Evaluation*. 3(1):1-26. 1981.
 49. M.F. Leach, G.A. Rubin, and J.C. Williams. Particle Size Distribution Characterization from Acoustic Emissions. *Powder Technology*. 19(2):157. March/April 1978.
 50. Correspondence and product literature from Mr. Hugh North, Malvern/Insitec, San Ramon, California, to Mr. Kenneth Woodard, U.S. EPA. January 14, 1998.
 51. Knapp, K.T. "Elemental Composition of Sized Profiles Emitted from Stationary Sources," in *Proceedings of the International Symposium on Recent Advances in Particulate Science and Technology* held on December 8-10, 1982, in Madras, India. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology, Madras, India. 1986.
 52. Chen, B.T., Y.S. Cheng, and H.C. Yeh. Tests of the Size resolution and Size Accuracy of the Lovelace Parallel-Flow Diffusion Battery. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 52(2):75. February 1, 1991.
 53. Barr, E.B., Y.S. Cheng, and H.C. Yeh. Size Characterization of Carbonaceous Particles Using a Lovelace Multijet Cascade Impactor/Parallel-Flow Diffusion Battery Serial Sampling Train. *Aerosol Science and Technology*. 10(1):205. 1989.
 54. Hinds, W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley and Sons, New York, New York. 1982.

55. "Particle Sizing--Past and Present" (Particle Sizing Editorial Review). *Filtration and Separation*. July/August 1993.
56. McCain, J.D., W.G. Kistler, J.W. Ragland, R.L. Merritt. "Aerosol Size and Chemistry at a Coal-Fired Power Plant" in Proceedings: *Advances in Particle Sampling and Measurement* (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615), Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
57. Cushing, K.M., R.R. Wilson, W.E. Farthing, and D.B. Harris. "A Comparison of Several Particle-Sizing Techniques" in Proceedings: *Advances in Particle Sampling and Measurement* (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615), Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
58. Steele, W.J., W.B. Smith, W.E. Farthing, and R.C. Carr. "A Sensitive Particulate Monitor for Measuring the Approximate Opacity for Fabric Filter Systems" in Proceedings: *Advances in Particle Sampling and Measurement* (EPA-600/9-89-004; NTIS PB89-166615), Daytona Beach, Florida, October 1981. February 1989.
59. Sadakata, M., M. Motegi, Y. Mashio, T. Ishada, A. Harano, and H.J. Kim. Growth of Primary Soot Particles in an Atmospheric Premixed Methane Oxygen Flame. *Chemical Engineering Research and Design, Part A: Transactions of the Institute of Chemical Engineers*. 73(42):142-146. March 1995.
60. Huggins, F.E. D.A. Kosmack, G.P. Huffman, and R.J. Lee. "Coal Mineralogies by SEM Automatic Image Analyses," in *Scanning Electron Microscopy/I*. SEM Inc., AMF O'Hare, Chicago, Illinois. 1980.
61. Davidson, D.L. "The Analysis of particles by Electron Microscopy and Spectroscopy," in *Particle Characterization in Technology, Vol. I: Applications and Microanalysis*, J.K. Beddow, Ed. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 1984.
62. van de Plaats, G., H. Harps, and L. Willeams. Size Determination of Conductive Particles with a Coulter® Counter. Proceedings of the Particle Size Analysis Conference, Loughborough Tech. University, Loughborough, England. September 1981.
63. Berg, R.H. Electronic Size Analysis of Subsieve Particles by Flowing Through a Small Liquid Resistance (STP No. 234). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania. 1958.
64. Karuhn, R.F. and R.H. Berg. "Practical Aspects of Electrozone® Size Analysis," in *Particle Characterization in Technology, Vol. I: Applications and Microanalysis*, J.K. Beddow, Ed. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 1984.

65. Kinsman, S. "Particle Size Instrumentation--Coulter® Counter," in *Particle Characterization in Technology, Vol. I: Applications and Microanalysis*, J.K. Beddow, Ed. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 1984.
66. Corbin, R.G., J.K. Horrocks, D. Towell, and C. Wainwright. Measurement of Particle Size and Charge from an Electrostatic Filter. *Filtration and Separation*. 24(4):248-251. July-August 1988.
67. Multiple Metals Stack Emissions Measurement Methodology (EPA/600-A-93/089; NTIS PB93-185734). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1993.
68. "Methodology for the Determination of Metals Emissions in Exhaust Gases from Hazardous Waste Incineration and Similar Combustion Sources," in *Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods (SW-846, Third Edition)*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C. September 1988.
69. "Methodology for the Determination of Metals Emissions from Hazardous Waste Incineration and Similar Combustion Sources," in *Methods Manual for Compliance with the BIF Regulations Burning Hazardous Waste in Boilers and Industrial Furnaces (EPA/530-SW-91-010)*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. December 1990.
70. Screening Methods for the Development of Air Toxics Emission Factors (EPA-450/4-91-021). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1991.
71. Ahearn, A.I. *Trace Analysis by Mass Spectrometry*. Academic Press, New York, New York. 1972.
72. Fassel, V. A. Quantitative Elemental Analyses by Plasma Emission Spectroscopy. *Science*, Vol. 202, 1978.
73. Morrison, G. H. *Trace Analysis Physical Methods*. Wiley Interscience, New York, 1965.
74. Kaufman, R. and P. Wieser. "Laser Microprobe Mass Analysis in Particle Analysis," in *Particle Characterization in Technology, Vol. I: Applications and Microanalysis*, J.K. Beddow, Ed. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 1984.
75. Priorities and Procedures for Development of Standards of Performance for New Stationary Sources of Atmospheric Emissions (EPA-450/3-76-020). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. May 1976.

76. Lambert, J.P.F., and F.W. Wilshire. Neutron Activation Analysis for Simultaneous Determination of Trace Elements in Ambient Air Collected on Glass-Fiber Filters. *Anal. Chem.* 51. 1979.
77. Goold, R.W., C.S. Barrett, J.B. Newkirk, and C.O. Ruud. *Advances in X-ray Analysis*. Kendall/Hunt, Dubuque, Iowa. 1976.
78. Snell, F.D. *Photometric and Fluorometric Methods of Analysis: Metals, Part I*. John Wiley, New York, New York. 1978.
79. McFadden, W.H. *Techniques of Combined Gas Chromatography/Mass Spectrometry*. John Wiley, New York, New York. 1978.
80. Kirkland, J.J. *Modern Practice of Liquid Chromatography*. John Wiley, New York, New York. 1971.
81. Swanson, D., et al. *A Rapid Analytical Procedure for the Analysis of BaP in Environmental Samples*. *Trends Fluoresc.* 1. 1978.

4. PROPUESTAS PARA LA SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLES Y LA REDACCIÓN DE LA FUENTE PARA LA MATERIA PARTICULADA

Esta sección discute el uso de la sustitución del combustible y la optimización del proceso para lograr reducciones en las emisiones de MP. En varios casos, estas prácticas pueden ser más fáciles y menos costosas que mejorar la tecnología de control existente o invertir en nuevos controles de adición.

La sustitución de combustibles, o cambio de combustibles, es usada típicamente como un medio para reducir las emisiones proveniente de fuentes de combustión, tales como los generadores de electricidad para servicio público y las calderas industriales. Implica el reemplazo del combustible en uso con un combustible que emite una menor cantidad de un contaminante determinado al ser quemado. Algunos ejemplos comunes de esto sería la sustitución del cabrón con aceite o gas natural en una planta generadora de energía eléctrica para servicio público. Las técnicas de reducción de la fuente consisten por lo general en modificar u optimizar un proceso determinado para mejorar su operación, ya que muchas emisiones de MP son el resultado de procesos que no están rindiendo todo su potencial. Estas emisiones pueden ser reducidas o eliminadas alterando el proceso.

4.1 SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLE

La sustitución del combustible puede ser un medio efectivo para reducir las emisiones para muchos tipos de procesos que usan la incineración de combustible para proporcionar calor para el proceso o producir electricidad. La incineración de combustible es responsable de emisiones significantes de MP_{10} y $MP_{2.5}$, tanto como de SO_x y NO_x . Los dispositivos de control, tales como los filtros de tela y los precipitadores electrostáticos son con frecuencia la primera opción para el control de MP para las fuentes de incineración de combustible. Sin embargo, los controles de adición pueden requerir una inversión de capital muy grande.

El tipo de combustible y de proceso tiene un grande impacto sobre las emisiones de MP proveniente de la combustión. El carbón, el aceite y el gas natural son los combustibles más comunes que se utilizan. De estos combustibles, la incineración del carbón resulta por lo general en las emisiones más altas de MP. Los cuatro tipos principales de carbón son el bituminoso, el sub-bituminoso, la antracita y la lignita;¹ sus características y emisiones son muy diferentes. El aceite se clasifica de manera general como residual o destilado. Los aceites residuales contienen más azufre y ceniza que contribuye a emisiones más altas. Los aceites combustibles también se describen por números. Los aceites combustibles de números 1 y 2 son destilados. Los números 5 y 6 son residuales y el aceite combustible número 4 puede ser un destilado o una mezcla de residual y destilado.¹ El gas natural es un combustible que se quema relativamente en limpio y resulta típicamente en mucho menos MP que el aceite o el carbón.¹

4.1.1 Aplicabilidad

Existen varias consideraciones para determinar si la sustitución de combustibles es la mejor opción para reducir las emisiones provenientes de una fuente determinada. Para muchas calderas antiguas, el gasto asociado con los nuevos controles de adición o las modificaciones a los controles existentes no es práctico. La sustitución del combustible es una opción especialmente atractiva para estas calderas debido a que la inversión de capital es generalmente pequeña al compararse con la inversión necesaria para los dispositivos de control.

Para que la sustitución del combustible sea práctica, debe existir un combustible apropiado para el reemplazo a un costo aceptable. Los combustibles posibles deben ser evaluados usando los criterios de rendimiento, disponibilidad y costo.² El primer requisito es que el combustible de reemplazo proporcione una reducción significativa en las emisiones en comparación al combustible original. El efecto que ejerce el combustible de sustitución sobre las emisiones de otros contaminantes debe ser considerado de igual manera. Por ejemplo, cambiar el gas natural por carbón reducirá las emisiones de MP y eliminará prácticamente los SO_x.

Mientras la mayoría de las zonas industrializadas tienen acceso a una variedad de combustibles, algunos combustibles pudieran no ser prácticos en ciertas localidades debido al costo. El gas natural y el aceite combustible son suministrados por lo general por medio de tuberías. Las localidades que no se encuentren vecinas a tuberías existentes podrían descubrir cuán costoso sería colocar un suministro de gas natural o de aceite combustible. Las unidades industriales o comerciales más pequeñas pueden confiar en la entrega por camión. Puesto que el carbón es suministrado de manera típica por medio del ferrocarril y las características del carbón proveniente de diferentes zonas del país varían ampliamente, algunos tipos de carbón pudieran no ser aplicables como combustible de sustitución para una localidad determinada porque deben ser enviados desde una distancia poco razonable.

En la mayoría de los casos, el proceso deberá ser modificado para acomodar el cambio a un tipo diferente de combustible. Para ciertos tipos de calderas accionadas por carbón, tales como los fogones, pudiera ser impráctico reconstruirlos para quemar un combustible líquido o gaseoso. El cambio de combustibles con frecuencia requerirá la reconstrucción del dispositivo de control en uso además del proceso. En consecuencia, la sustitución del combustible no sería aplicable a las fuentes con costos excesivos de reconstrucción.

Además de los requisitos para la modificación de la fuente, los precios de los combustibles pueden ser un factor determinante para la sustitución de combustibles. Puesto que el carbón, el aceite y el gas natural tienen precios diferentes basados en sus valores de capacidad de calentamiento, la sustitución de combustibles también puede aumentar los costos de operación. Los costos de la sustitución de combustibles se discutirá más ampliamente en la sección 4.1.3.

4.1.2 Reducciones de Emisiones por Sustitución de Combustibles

Si se aplica la sustitución del combustible a un proceso de combustión determinado, éste puede resultar en reducciones significantes en las emisiones de MP. En general, las emisiones de MP y SO_2 son las más altas en el caso del carbón y las más bajas en el caso del gas natural. Las tablas 4.1 y 4.2 muestran las reducciones potenciales de las emisiones de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$, respectivamente, con el cambio de combustibles. Las tablas proporcionan matrices que muestran las reducciones aproximadas de las emisiones para el cambio de carbón bituminoso a sub-bituminoso, de carbón a aceite y de aceite a gas. El aceite destilado no fue proporcionado como un combustible de reemplazo para las fuentes de servicio público porque no es incinerado típicamente en las calderas de servicios públicos.

Las reducciones de las emisiones fueron calculadas basándose en los factores de emisión y la composición del combustible.¹ Los factores de emisión dependen del tipo de combustible y el tipo de proceso de combustión que es empleado. Las reducciones potenciales logradas al cambiar de carbón bituminoso a sub-bituminoso en las tablas 4.1 y 4.2 se basaron en las emisiones provenientes de calderas de fondo seco, puesto que las calderas de fondo seco son responsables del porcentaje más alto de emisiones de MP proveniente de la combustión del carbón.³ Además, las calderas de fondo seco tienen factores menores de emisión de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ que las calderas de fondo húmedo y todo tipo de fogones.¹ Se supuso que los factores de emisión para la combustión de carbón en industrias y servicios públicos en el mismo tipo de calderas eran los mismos.¹ Las variaciones en las emisiones de MP provenientes de la combustión de aceite se debe a las diferencias en las unidades industriales y de servicios públicos, por lo tanto, tienen emisiones menores de MP. Este es también el caso con la combustión de gas natural.¹

En términos de la composición, el contenido de ceniza es un factor principal para determinar las emisiones de MP. En general, a mayor contenido de ceniza en un combustible, mayor será la cantidad de MP emitida al ser quemado.¹ Para estos cálculos, se usó un valor promedio del 8.6 por ciento por peso de ceniza (6.62 libras por 10^6 Btu) en carbón bituminoso. Se supuso que el contenido promedio de ceniza del carbón sub-bituminoso era del 5.2 por ciento en carbón bituminoso fue usado. El promedio del contenido de ceniza de carbón sub-bituminoso fue asumido en (4 libras por 10^6 Btu).⁴ Las emisiones de particulados provenientes de la combustión de aceite dependen del contenido de ceniza y azufre.¹ El incremento del contenido de azufre aumentará las emisiones de MP provenientes de la combustión del aceite porque el azufre inhibe la combustión completa.¹ Además, un pequeño porcentaje (del 1% al 3%) del azufre en el aceite es emitido como particulado de sulfato.¹ Se estimó que el aceite residual tenía un contenido de ceniza del 2.5 por ciento (1.3 libras de 10^6 Btu).⁴ Se estimó que el aceite destilado tenía un contenido de ceniza por debajo del 0.01 por ciento (<0.005 libras por 10^6 Btu) y un contenido de azufre del 0.22 por ciento (0.115 libras por 10^6 Btu).⁴ A continuación se presenta el ejemplo de un cálculo de la reducción potencial de emisiones de MP_{10} asociada con el cambio de carbón bituminoso a aceite destilado.

Tabla 4.1. Reducciones Potenciales de Emisiones de PM₁₀ con Sustitución de Combustible (Referencias 1, 4, and 5)

Combustible Original	Reducciones Estimadas de MP ₁₀ con la Sustitución de Combustibles (por ciento)						
	Industrial			Servicios Públicos			
	Sub-bituminoso	Aceite Residual ^a	Gas Natural	Aceite Destilado ^b	Sub-bituminoso	Aceite Residual ^a	
Carbón bituminoso	21.4	62.9	98.2	99.0	21.4	69.5	
Carbón sub-bituminoso	--	52.8	97.7	98.8	--	61.2	
Aceite Residual ^a	--	--	95.1	97.4	--	--	
						Gas Natural	
							99.3
							99.2
							97.9

^a El aceite residual incluye los aceites combustibles No. 4, 5 y 6.

^b El aceite destilado es el aceite combustible No. 2.

Tabla 4.2. Reducciones Potenciales de Emisiones de MP_{2.5} con Sustitución de Combustible (Referencias 1, 4 y 5)

Combustible Original	Reducciones Estimadas de MP _{2.5} con la Sustitución de Combustible (por ciento)						
	Industrial			Servicios Públicos			
	Sub-bituminoso	Aceite Residual ^a	Gas Natural	Aceite Destilado ^b	Sub-bituminoso	Aceite Residual ^a	
Carbón bituminoso	21.4	7.4	93.1	99.1	21.4	14.8	
Carbón sub-bituminoso	--	--	91.2	98.8	--	--	
Aceite Residual ^a	--	--	92.5	99.0	--	--	
						Gas Natural	
							97.5
							96.8
							97.0

^a El aceite residual incluye los aceites combustibles No. 4, 5 y 6.

^b El aceite destilado es el aceite combustible No. 2.

Los factores de emisión de PM_{10} para la combustión del carbón bituminoso y el aceite destilado en las calderas de fondo seco son 2.3(A) libras por tonelada y 1 libra por 10^3 galones, respectivamente.¹ En el factor de emisión de carbón, (A) se refiere al contenido de ceniza del combustible. Debido a que estos factores se basan en toneladas de carbón y galones de aceite, deben ser convertidos en factores basados sobre el valor de calentamiento del combustible para ser útiles. Esto se logra dividiendo el factor de emisión por el valor de calentamiento:

Carbón bituminoso:

$$(2.3 \text{ libras/tonelada})(8.6)/(26,000,000 \text{ Btu/tonelada}) = 0.761 \text{ libras}/10^6 \text{ Btu}$$

Aceite destilado:

$$(1 \text{ libras}/10^3 \text{ galones})/(138,000,000 \text{ Btu}/10^3 \text{ galones}) = 0.007 \text{ libras}/10^6 \text{ Btu}$$

La reducción potencial en las emisiones de MP_{10} al cambiar carbón bituminoso a aceite destilado se calcula restando el factor de emisión para el aceite (EF_{aceite}) proveniente del factor de emisión para el carbón ($EF_{\text{carbón}}$) proveniente del factor de emisión para el carbón y dividiendo enseguida por el factor de emisión del carbón:

Reducción potencial

$$\begin{aligned} &= [(FE_{\text{carbón}}) - (FE_{\text{aceite}})]/(FE_{\text{carbón}}) \\ &= [(0.761 \text{ libras}/10^6 \text{ Btu}) - (0.007 \text{ libras}/10^6 \text{ Btu})]/(0.761 \text{ libras}/10^6 \text{ Btu}) \\ &= 0.99 \text{ o } 99 \text{ por ciento} \end{aligned}$$

Las tablas 4.1 y 4.2 indican que las reducciones máximas en las emisiones de MP_{10} y $MP_{2.5}$ pueden ser obtenidas por el cambio del carbón o el aceite residual al gas natural o aceite destilado. Las reducciones presentadas en estas tablas se basaron en los valores promedio discutidos anteriormente; las reducciones reales variarán según la composición específica de combustible.

4.1.3 Costos

Los costos asociados con la sustitución se relacionan con la modificación de la unidad en uso y la adquisición del combustible de reemplazo. La modificación del proceso de combustión para quemar otro combustible puede ser una tarea excepcional, siendo las modificaciones necesarias únicas para cada caso. En general, el cambio de un tipo de carbón o grado de aceite a otro es menos costoso que el cambio de carbón a aceite o gas natural. En algunos casos, el costo de la modificación del proceso de combustión para utilizar el combustible nuevo vuelve impráctica la Sustitución de combustible. Otro costo posible de la modificación se relaciona a los dispositivos de control existentes, los cuales también pueden requerir modificaciones para acomodar el tipo de emisiones asociadas con el combustible nuevo.

También podría existir un diferencial de costo entre los combustibles. Si el combustible de reemplazo es mucho más costoso que el combustible que se encuentra en uso, los costos de operación

Tabla 4.3. Precios Promedio del Carbón, el Aceite y el Gas Natural^a
(Referencias 5, 6, y 7)

Combustible	Precio Promedio	
	Precio Común	\$/MMBtu
Carbón sub-bituminoso		
Servicios Públicos	\$27.01/tonelada	1.35
Industrial	\$32.37/tonelada	1.62
Cambón bituminoso		
Servicios Públicos	\$27.01/tonelada	1.04
Industrial	\$32.37/tonelada	1.25
Aceite residual ^c	\$390/10 ³ galón	2.60
Aceite del destilado ^c	\$616/10 ³ galón	4.47
Gas natural ^c	\$1680/10 ⁶ pies cúbicos estándares	1.68

^a Se pueden obtener precios más actualizados de *Monthly Energy Review*, una publicación del *U.S. Department of Energy*, Departamento de Energía, Washington, DC.

^b Precios promedio en 1995.

^c Precios promedio a partir de septiembre de 1996.

podrían aumentar considerablemente. La tabla 4.3 proporciona los precios promedio para el cambón, el aceite y el gas natural, en términos de unidades comunes y valor de calentamiento.^{5,6,7} Estos precios variarán dependiendo de la localidad en particular dentro de los Estados Unidos.

4.1.4 Otros Impactos

Además de reducir las emisiones de MP, la Sustitución de combustibles también puede reducir las emisiones de otros contaminantes, tales como los SO_x y los NO_x. Las reducciones potenciales de SO_x con el cambio de combustibles se proporcionan en la tabla 4.4. El gas natural es especialmente efectivo para el control de SO_x control, eliminando casi el 100 por ciento de los SO_x. Las plantas

generadoras de energía accionadas por carbón han ido cambiando al carbón occidental como un medio para reducir las emisiones de SO_x ,² puesto que los carbones occidentales poseen contenidos más bajos de azufre que otros carbones orientales de otra manera comparables. Desafortunadamente, la ceniza baja en azufre es más difícil de recolectar en los PES, de manera que el cambio a carbón occidental generalmente requerirá el acondicionamiento del gas del tubo de escape o una modificación

Table 4.4. Reducciones Potenciales de los SO_x con el Intercambio del Combustible

Combustible Original	Reducciones Estimadas de SO_x con Combustible de Reemplazo (por ciento)				
	Carbón Sub-bituminoso	Carbón de Lignita ^a	Aceite Combustible No. 4 ^b	Aceite Combustible No. 2 ^c	Gas Natural
Carbón Bituminoso	72.9	80.2	47.4	91.2	99.9
Carbón Sub-bituminoso	--	26.9	--	69.5	99.9
Aceite Combustible No. 6 ^d	--	--	46.2	91.5	99.9
Aceite Combustible No. 4 ^b	--	--	--	84.3	99.9
Aceite Combustible No. 2 ^c	--	--	--	--	99.7

^a Carbón de lignita con alto contenido de ceniza de sodio y contenido de azufre del 0.4 por ciento por peso.

^b Mezcla de destilado y residual con un contenido promedio de azufre del 1.35 por ciento por peso.

^c Aceite del destilado con un contenido promedio de azufre del 0.22 por ciento por peso, típicamente

del dispositivo de control para mantener la eficiencia de recolección de MP.²

Se ha comprobado que la Sustitución de gas natural por carbón es efectivo en la reducción de las emisiones de NO_x . En 1992, el Servicio Público Eléctrico y Gas (PSE&G) los el del demostró controlan el estacional del emisiones del las del NO_x operando dos calderas de servicios con gas natural en lugar de carbón durante tres meses de la temporada de emisiones de ozono (junio, julio y agosto).⁸

4.2 MODIFICACIÓN/OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

La modificación y/o optimización puede ser un medio efectivo de reducir las emisiones de MP. Algunos ejemplos generales de optimización de proceso incluyen la reducción de la frecuencia de las operaciones de transferencia de masa, el mejoramiento de la eficiencia operacional y el uso apropiado de los dispositivos de recolección de polvo en el punto de generación.

La manufactura puede requerir muchos pasos individuales del proceso que consisten en funciones simples. Los pasos de transferencia de materiales pueden causar emisiones fugitivas de MP y una pérdida costosa del producto. Un análisis cuidadoso de todos los pasos del proceso pudiera revelar algunos pasos innecesarios o repetitivos que pueden ser eliminados, resultando en más pocas emisiones fugitivas.⁸

Las características de las partículas también pueden tener un impacto significativo sobre las velocidades de emisión de MP. El tamaño de las partículas ejerce un efecto directo en cuanto a que las partículas más grandes se asientan más rápidamente y son recolectadas con mayor facilidad en los dispositivos de control. Por lo tanto, las técnicas de humedecimiento y aglomeración en general incrementan el tamaño de las partículas y la eficiencia del equipo de control.⁹ El rendimiento de algunos dispositivos de control, tales como los PES, también se influyen por la composición química de las partículas. EL acondicionamiento del gas del tubo de escape (véase la sección 5.1) es un medio para alterar la composición de las partículas y mejorar las condiciones para la precipitación electrostática.

Algunas técnicas específicas de modificación/optimización de proceso para reducir las emisiones de MP son:

- C Cambiar de una cúpula a un horno de arco eléctrico.⁹
- C Cambiar de un elevador de cubeta (abierto) a un transportador neumático más eficiente (cerrado).⁹
- C Separar y eliminar el coque de tamaño reducido (<1 pulgada) para reducir las emisiones fugitivas de los hornos de explosión en las fundiciones primarias de metal.¹⁰
- C Mejorar la eficiencia de combustión de los hornos de explosión durante la fundición primaria del plomo mediante el mejoramiento del sistema de enfriamiento del agua del horno.¹⁰
- C Inyectar sodio fundido durante el escoria miento por caldera en la fundición primaria de plomo para formar una maraña líquida en vez de escoria.¹⁰
- C Eliminar la MP fugitiva proveniente del transporte, vaciado, y agitación del plomo fundido mediante el uso de un escoria miento continuo por caldera en vez de uno

manual en la fundición primaria de metal (como se realiza en la actualidad solamente en instalaciones en el extranjero).¹⁰

- C Mejorar la calidad de la materia prima, o sea, mejorar la calidad del coque y del concentrado para esmerilado usado en la producción primaria de metal.¹⁰
- C Enfriar las calderas de plomo para reducir la generación de humos durante el escoria miento por caldera en la producción primaria de metal.⁹
- C Bombear el metal (primario) directamente hacia las calderas de escoria miento usando una bomba electromagnética.¹⁰
- C Aglomerar el polvo de la chimenea de un horno de explosión en un horno aglomerador para reducir la carga sobre la casa de bolsas y mejorar su rendimiento. Este proceso elimina por completo el manejo del polvo y las emisiones fugitivas asociadas, y elimina las emisiones fugitivas provenientes de las pilas de almacenamiento del polvo de la chimenea.¹⁰
- C Usar vaciados de molde permanentes en las fundiciones de acero gris en vez de arena verde. Se reporta que ésto reduce las emisiones de MP en un 99 por ciento.¹⁰
- C Tratar previamente las materias primas para la manufactura de vidrio para reducir la cantidad de partículas finas. Los pre-tratamientos incluyen: el esmerilado previo, el adoquinado, la formación de perdigones o el tratamiento con alcalí líquido.¹⁰
- C Reponer los lubricantes de grasa y aceite (por ejemplo, en la manufactura de vidrio) con emulsiones de silicón y aceites solubles en agua que eliminan el humo generado por la vaporización alérgica (relámpago) de hidrocarburos provenientes de las grasas y aceites que entran en contacto con los materiales de proceso.¹⁰
- C Afinar las calderas industriales para lograr una combustión más eficiente para reducir la MP que ocurre como resultado de la combustión incompleta.
- C Utilizar un *Burning Image analyZER (BIZER)*, el analizador de la impresión de combustión de la compañía *ABB Industry Oy* de Finlandia, que permite el control de la combustión para las calderas de recuperación del molino de pulpa *Kraft* (de papel fuerte). En este proceso, cámaras infra-rojas observan la pila de fundición y proporcionan un procesamiento digital de la imagen para presentar la información de la combustión. Esta técnica puede ser usada para el control automático de la combustión.¹⁰

- C El uso de *Oilless, Dry Centrifugal "Leak-Free" Compressors*, compresores centrífugos secos, sin aceite y “a prueba de fugas” de la compañía *Hitachi, Ltd.* del Japón, elimina las fugas fugitivas y ahorra energía. La reducción de MP se logra a través de la eficiencia de energía. Este dispositivo se usa en la actualidad en refinerías de petróleo.¹¹

- C Polonia ha desarrollado una técnica de pirolisis del carbón que produce un combustible mejor. El carbón triturado seco se descompone en gas y residuo sólido en un reactor circulador de lecho fluidizado. El gas es quemado en una turbina y el residuo sólido se mezcla con carbón y se comprime en forma de ladrillos de combustible que no produce humo llamado *ECOCOAL* (ECOCARBON). El *ECOCOAL* posee de 1.2 a 1.7 veces la eficiencia termal del carbón con emisiones de MP menores hasta en un 50 por ciento.¹¹

- C El *QSL Process for Secondary Lead Smelting*, el proceso QSL para la fundición secundaria del plomo de la compañía *Lurgi Metallurgie* (República Federal de Alemania). El uso de un reactor completamente cerrado diseñado para tratar todos los grados resulta en un control mayor del 90 por ciento de la MP.¹¹

- C La tecnología de tratamiento de calor con lecho fluidizado para la manufactura primaria de metal desarrollada por la compañía *Quality Heat Treatment Pty, Ltd.*, de Australia. Un proceso de tratamiento de calor de la fase gaseosa usa un lecho fluidizado de partículas de alumina y se encuentra completamente encerrado, permitiendo la recolección de las emisiones fugitivas de MP.¹¹

- C El proceso para ferro-aleaciones de la compañía *Dow Chemical* (Estados Unidos). Se utiliza oxígeno puro en vez de aire en un horno cerrado que no produce polvo alguno.

4.3 REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 4

1. Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). volume I (Fifth Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. January 1995.
2. Rembold, D. and R. Rupinkas. CAA Compliance: Fuel Switching Can Be Complex, Yet Rewarding. Electrical World. April 1994.
3. Source Category Emission Reductions with Particulate Matter and Precursor Control Techniques. Prepared for K. Woodard, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina (AQSSD/IPSG), under Work Assignment II-16 (EPA Contract No. 68-03-0034), "Evaluation of Fine Particulate Matter Control." September 30, 1996.
4. Perry, R.H. and D.W. Green. Perry's Chemical Engineers' Handbook (6th Edition). McGraw-Hill Publishing Company, Inc., New York, New York. 1984.
5. Quarterly Coal Report, October-December 1995 (DOE/EIA-0121(95/4Q)). Energy Information Administration, Department of Energy, Washington, DC. May 1996.
6. Electric Power Monthly, April 1996 (DOE/EIA-0226(96/04)). Department of Energy, Washington, DC. April 1996.
7. Industry Statistics. Oil & Gas Journal. September 16, 1996.
8. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-18-005a, NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
9. Estimating and Controlling Fugitive Lead Emissions from Industrial Sources (EPA-452/R-96-006). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. May 1996.
10. Assessment of International Air Pollution Prevention and Control Technology for Title IX of the Clean Air Act Amendments. Draft Report to Congress. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. July 1996.

5. SISTEMAS DE LIMPIEZA DEL GAS DE ESCAPE PARA FUENTES ESTACIONARIAS

Esta sección discute los sistemas de limpieza del gas de escape para fuentes estacionarias que pueden ser utilizados en industrias con corrientes de escape cargadas de partículas. Los dispositivos discutidos son precipitadores electrostáticos (PES), filtros de tela, absorbedores en húmedo e incineradores (utilizados para corrientes con contenidos especialmente altos tanto de compuestos orgánicos volátiles como de MP). La sección principia con una discusión de los dispositivos para tratamiento previo que pueden ser utilizados para reducir la carga de MP sobre el dispositivo primario de control y el acondicionamiento del gas del tubo de escape que puede mejorar la recolección de partículas.

Cada sección incluye una descripción del dispositivo, los mecanismos de recolección, y la discusión de diferentes sistemas de diseño. También se incluye una discusión de la aplicabilidad del dispositivo a los varios procesos a los que se pueden aplicar los controles. La efectividad del dispositivo, en términos del rango de eficiencias para varios tipos de sistemas y aplicaciones se discute enseguida, con un enfoque especial sobre la MP_{10} y la $MP_{2.5}$. Se incluyen las curvas generales que relacionan el tamaño de las partículas con la eficiencia junto con una discusión de los parámetros que influyen la eficiencia y sus impactos cuantitativos. Dos tipos de eficiencia, fraccionaria y cumulativa, se discuten en esta sección. La eficiencia fraccionaria se refiere a la eficiencia de un dispositivo de control únicamente para un tamaño particular de partícula, tal como 10 micras de diámetro. La eficiencia cumulativa es la eficiencia de un dispositivo de control para un tamaño de partícula en particular y todas las partículas menores que una partícula de ese tamaño, tales como la MP_{10} , que incluye a todas las partículas con diámetros aerodinámicos de 10 micras o menores.

Los costos de los dispositivos se discuten, e incluyen tablas y curvas de costos derivadas utilizando el protocolo estándar de la *EPA*. Una discusión de los parámetros que afectan el costo y la relación entre los costos y estos parámetros se incluye en cada sección de costo. En muchos casos, los costos han sido actualizados al cuarto trimestre de 1996 utilizando el Índice Vatajuk de Costos para el Control de la Contaminación del Aire, *Vatajuk Air Pollution Control Cost Index (VAPPCI)*. Este índice se proporciona en el apéndice B. El índice también se publica mensualmente en la revista *Chemical Engineering*. Al final, la energía y otros impactos ambientales, tales como la contaminación del agua y la generación de residuos, se discuten junto con las medidas potenciales de mitigación.

5.1 TRATAMIENTO PREVIO

El rendimiento de los dispositivos para el control de particulados a menudo puede ser mejorado a través del tratamiento previo de la corriente de gas. Para los dispositivos para el control de la MP, el tratamiento previo consiste de dos categorías: recolección previa y acondicionamiento del gas del tubo de escape. Los dispositivos de recolección previa remueven las partículas grandes de la corriente de gas, reduciendo la carga sobre el dispositivo de control primario. Las técnicas de acondicionamiento de gases alteran las características de las partículas y/o la corriente de gas para permitir que el dispositivo de control primario funcione más efectivamente. Ambos tipos de tratamiento previo pueden conducir a una mayor eficiencia de recolección y de vida de operación, a la vez que reducen los costos de operación. El rendimiento de los dispositivos de recolección se discute en la sección 5.1.2.

5.1.1 Dispositivos de Precolectión

La gran mayoría de los dispositivos de recolección previa son recolectores mecánicos. Los recolectores mecánicos son una clase de dispositivos que dependen de la gravedad y la inercia para la recolección de partículas. Son utilizados extensivamente en la industria debido a varias ventajas que poseen. Los recolectores mecánicos tienen bajos costos de capital, la habilidad de operar en ambientes severos, y bajos requisitos de mantenimiento debido a la ausencia de partes móviles.¹ También existen desventajas asociadas con los recolectores mecánicos, tales como las eficiencias de recolección relativamente bajas para las partículas pequeñas. Mientras esto de hecho previene su uso como dispositivos primarios de recolección en muchas aplicaciones, no es una preocupación principal cuando los recolectores mecánicos son utilizados para la recolección previa. Algunos recolectores mecánicos pueden alcanzar altas eficiencias de recolección, aunque únicamente con los altos costos de operación asociados con grandes caídas de presión.¹ Los cinco tipos principales de recolectores mecánicos son las cámaras de sedimentación, los Purificadores, los separadores por momento, los recolectores con ayuda mecánica, y los separadores centrífugos (ciclones); estos dispositivos se discuten por separado a continuación.

5.1.1.1 Cámaras de Sedimentación

Los recolectores mecánicos más sencillos son las cámaras de sedimentación, que dependen de la sedimentación gravitacional como un mecanismo de recolección. Las cámaras de sedimentación previenen la abrasión excesiva, y la carga de partículas en los dispositivos primarios, de recolección al remover a las partículas grandes de la corriente de gas.² A pesar de las bajas eficiencias de recolección, las cámaras de sedimentación aún se utilizan extensivamente. En particular son útiles para las industrias que también necesitan enfriar la corriente de gas previo al tratamiento en un filtro de tela. Las industrias procesadoras de metales y productos minerales tienen varias aplicaciones para las cámaras de sedimentación. Existen dos tipos principales de cámaras de sedimentación: la cámara de expansión y la cámara de placas múltiples. En la cámara de expansión, la velocidad de la corriente de gas es reducida significativamente a medida que el gas se expande hacia el interior de una gran cámara. La reducción en la velocidad permite que las partículas grandes se asienten separándose de la corriente de gas.³ La figura 5.1-1 muestra un diagrama esquemático de una cámara de expansión, que consiste en una cámara sencilla con tolvas para recolección.²

Una cámara de sedimentación con placas múltiples, presentada en la figura 5.1-2, es una cámara de expansión, con un número de placas delgadas colocadas a corta distancia entre sí dentro de la cámara, que causan que el gas fluya horizontalmente en medio de ellas.² Mientras que la velocidad del gas es incrementada ligeramente en una cámara con placas múltiples, la eficiencia de recolección generalmente mejora debido a que las partículas tienen que recorrer una distancia menor de caída antes de ser

recolectadas. Una cámara de expansión debe ser muy grande para recolectar cualquier partícula pequeña, pero las cámaras con placas múltiples tienen menores requisitos de volumen para la recolección de partículas pequeñas (15 micras).³

5.1.1.2 Purificadores

Tal como las cámaras de sedimentación, los Purificadores también dependen de la sedimentación gravitacional para recolectar partículas. Un purificador está compuesto de uno o más tubos verticales o torres en series, por donde la corriente de gas asciende a través de los tubos. Las partículas mayores cuya velocidad de sedimentación terminal es mayor que la velocidad ascendente de gas, son recolectadas en el fondo del tubo, mientras que las partículas menores son acarreadas hacia afuera por la parte superior del tubo. Las clasificaciones por tamaño de las partículas recolectadas se puede lograr utilizando una serie de tubos con diámetros en aumento, tal como se muestra en la figura 5.1-3.^{2,3}

5.1.1.3 Separadores por Momento

Los separadores por momento utilizan ambas la gravedad y la inercia para separar partículas de la corriente de gas. La separación es lograda al forzar el flujo de gas, a cambiar marcadamente la dirección dentro de una cámara de sedimentación por gravedad por medio del uso de deflectores colocados estratégicamente. Típicamente, el gas primero fluye hacia abajo y después es forzado por los deflectores para fluir hacia arriba repentinamente. El momento inercial y la gravedad actúan sobre las partículas en una dirección hacia abajo, causando que las partículas mayores crucen las líneas de flujo del gas y se acumulen al fondo de la cámara.^{2,3}

Existen varios arreglos comunes de los deflectores en los separadores por momento, tal como se ilustra en la figura 5.1-4.^{2,3} Los separadores por momento son capaces de recolectar partículas tan pequeñas como de 10 micras a baja eficiencia (10-20 por ciento). Estos dispositivos requieren menos espacio que los asentadores por gravedad, pero poseen caídas de presión más altas.³

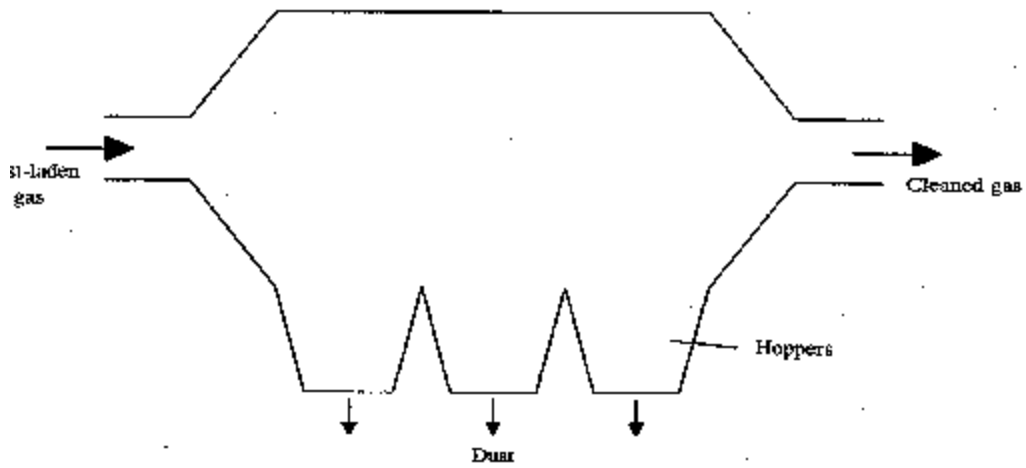


Figura 5.1-1. Cámara de Sedimentación por Expansión (adaptada de la Referencia 2).

Traducción de Términos

<i>Dust-laden gas</i>	Gas cargado de polvo	<i>Cleaned gas</i>	Gas limpiado
<i>Dust</i>	Polvo	<i>Hoppers</i>	Tolvas

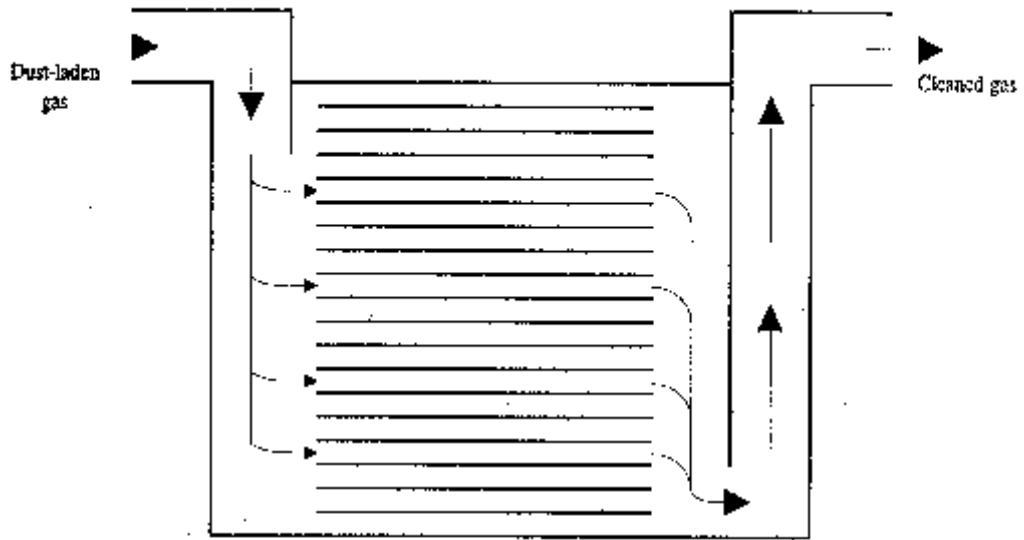


Figure 5.1-2. Multiple-Tray Settling Chamber (adapted from Reference 2).

Figura 5.1-2. Cámara de Sedimentación con Placas Múltiples (adaptada de la Referencia 2).

Traducción de términos

<i>Dust-Laden gas</i>	Gas cargado de polvo	<i>Cleaned Gas</i>	Gas limpio
<i>Collected Dust</i>	Polvo Recolectado		

5.1.1.4 Separadores con Ayuda Mecánica

Los separadores con ayuda mecánica dependen de la inercia como el mecanismo de separación. La corriente de gas es acelerada mecánicamente, lo cual aumenta la efectividad de la separación por inercia. Como resultado, los separadores con ayuda mecánica pueden recolectar partículas más pequeñas que los separadores por momento. Desafortunadamente, también tienen costos de operación más altos como resultado de caídas de presión más altas. Un tipo común de recolector con ayuda mecánica es el ventilador con aspas radiales modificadas que se muestra en la figura 5.1-5.³ En este dispositivo, la corriente de gas entra al centro del ventilador, perpendicular a la rotación de las aspas. Las aspas impulsan a las partículas a través de las líneas del flujo del gas, donde son concentradas sobre la superficie interior del contenedor. De ahí, las partículas son desviadas hacia una tolva de recolección mientras el gas continúa hacia afuera del separador. Los separadores con ayuda mecánica están sujetos al desgaste abrasivo por las partículas grandes y a la obstrucción por las partículas que se incrustan o acumulan sobre las aspas. En consecuencia, estos dispositivos tienen mayores requisitos de mantenimiento que otros separadores.^{2,3,4}

5.1.1.5 Ciclones

Los ciclones utilizan la inercia para remover partículas de una corriente de gas giratoria. Dentro de un ciclón, la corriente de gas es forzada a girar dentro de una cámara de forma generalmente cónica. Los ciclones operan creando un vértice doble dentro del cuerpo del ciclón. Se imparte un movimiento circular al gas entrante ya sea mediante una entrada tangencial o por medio de *vanes* giratorios en la entrada axial. El gas desciende por el ciclón en trayectoria espiral cerca de la superficie interior del tubo del ciclón. Al fondo del ciclón, el gas da la vuelta y asciende en trayectoria espiral a través del centro del tubo y hacia afuera por la parte superior del ciclón. La figura 5.1-6 ilustra la operación de vértice doble en un ciclón.¹

Las partículas en la corriente de gas son forzadas hacia las paredes del ciclón por la fuerza centrífuga del gas girando, pero es obstruidas por la fuerza de arrastre de fluidos del gas que viaja a través y hacia afuera del ciclón. Para las partículas que son grandes, el momento inercial contrarresta el momento inercial y causa que estas partículas abandonen el ciclón con el gas saliente. La gravedad también causa que las partículas mayores que alcanzan las paredes del ciclón se trasladen hacia abajo y dentro de una tolva en el fondo. Mientras dependen del mismo mecanismo de separación que los separadores por momento, los ciclones son más efectivos porque poseen un diseño más complejo del flujo de gas.^{2,3}

Recolectores de ciclón son clasificados por lo general en cuatro tipos, basándose en la manera que la corriente de gas es introducida y el polvo recolectado es descargado:

- C Entrada tangencial, descarga axial
- C Entrada axial, descarga axial
- C Entrada tangencial, descarga periférica
- C Entrada axial, descarga periférica

Los dos primeros tipos son los ciclones usados más comúnmente. Los diagramas esquemáticos de los cuatro tipos de ciclones se proporcionan en la figura 5.1-7.^{2,3}

Recolectores de ciclón pueden ser diseñados para muchas aplicaciones, y son categorizados típicamente como de alta eficiencia, convencionales, o de alto rendimiento. Los ciclones de alta eficiencia tienen más probabilidad de experimentar las caídas de presión más altas de los tres tipos de ciclones; los

ciclones de alto rendimiento pueden tratar grandes volúmenes de gas con una baja caída de presión.^{1,5} Cada uno de estos tres tipos de ciclones tiene el mismo diseño básico. Se logran diversos niveles de eficiencia de recolección y operación variando las dimensiones estándares del ciclón, identificadas en la figura 5.1-8,⁶ de acuerdo a los valores^{7,8,9} presentados en la tabla 5.1-1.^{1,6}

Un ciclón múltiple, presentado en la figura 5.1-9, es un tipo de ciclón de alta eficiencia que consiste en varios ciclones de diámetro pequeño operando en paralelo. Este arreglo permite el tratamiento de grandes velocidades de flujo a mayores eficiencias que en el caso de los ciclones sencillos.²

La mayor limitación en el uso de ciclones es la energía requerida para forzar el gas a través del cuerpo angosto del ciclón. La caída de presión en el ciclón puede ser estimada a partir de un número de ecuaciones que se basan en datos tanto teóricos como experimentales.¹⁰

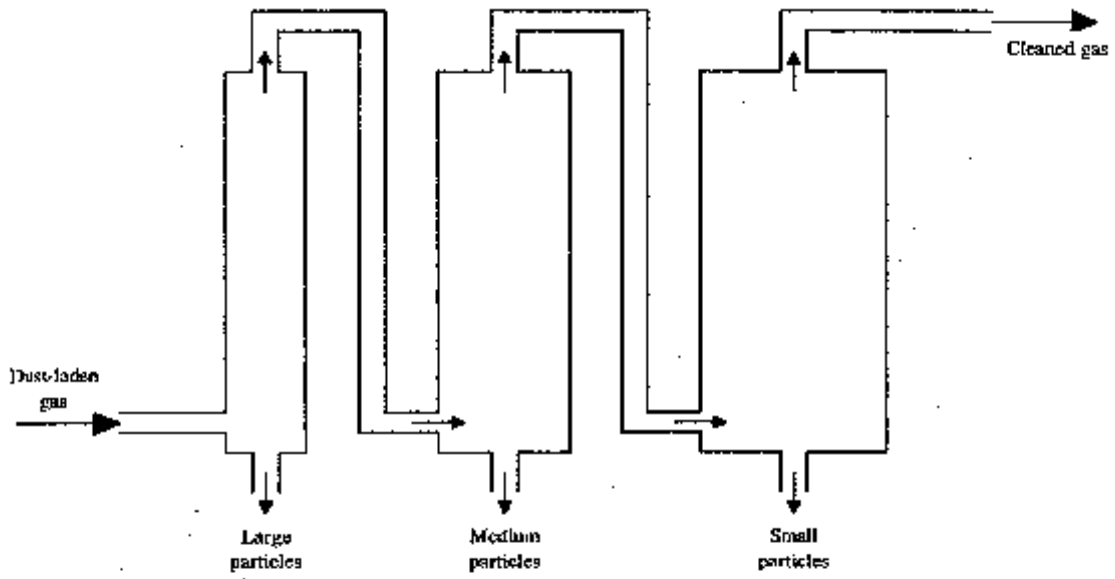


Figure 5.1-3. Elutriators in Series (Reference 3).

Figura 5.1-3 Purificadores en Series (Referencia 3).

Traducción

<i>Dust-laden gas</i>	Gas cargado de polvo	<i>Cleaned gas</i>	Gas limpio
<i>Large particles</i>	Particulas largas	<i>Medium particles</i>	Particulas medianas
<i>Small Particles</i>	Particulas pequeñas		

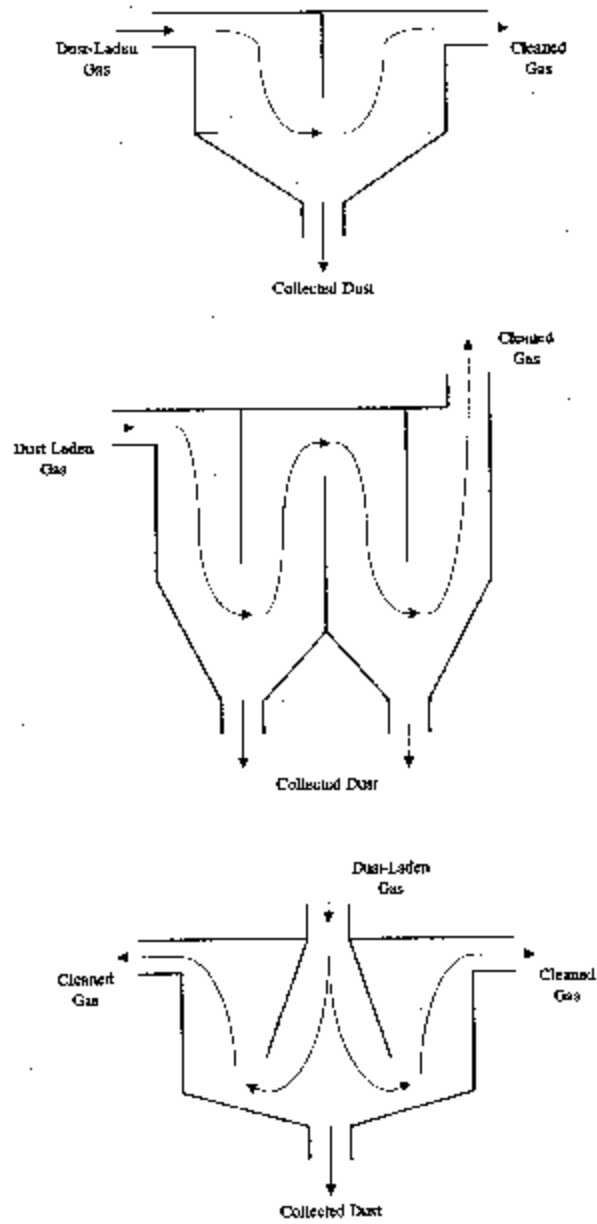


Figure 5.1 4. Momentum Separators (References 2 and 3).

Figura 5.1-4. Separadores de Momento (Referencias 2 y 3)
Traducción de Términos

<i>Dust-Laden gas</i>	Gas cargado de polvo	<i>Cleaned Gas</i>	Gas limpio
<i>Collected Dust</i>	Polvo Recolectado		

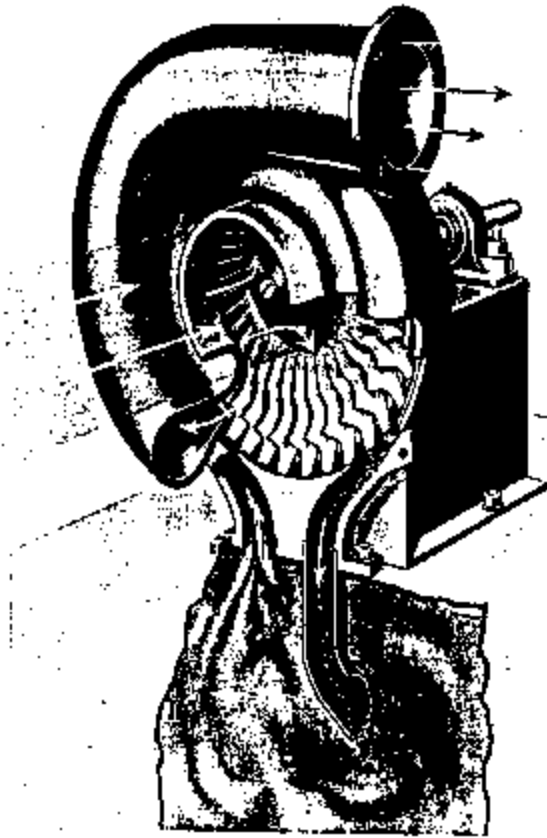


Figure 5.1-5. Mechanically-Aided Separator (Reference 3).

Figura 5.1-5. Separador con Ayuda Mecánica (Referencia 3).

5.1.2 Eficiencia de Recolección de Precolectores

Los recolectores preliminares mecánicos poseen un amplio rango de eficiencias de recolección. Los recolectores que dependen únicamente de la sedimentación por gravedad, tales como las cámaras de sedimentación y los purificadores, tienen típicamente las menores eficiencias de recolección. Los ciclones son los recolectores mecánicos más efectivos, con multiciclones que logran las eficiencias de recolección más altas.

5.1.2.1 Sedimentación por Gravedad

Las cámaras de sedimentación por gravedad son más efectivas para partículas grandes y/o densas. La eficiencia de recolección para la MP_{10} es muy baja, típicamente menor del 10 por ciento. La eficiencia de las cámaras de sedimentación aumenta con el tiempo de residencia del gas en la cámara. Debido a esto, las cámaras de sedimentación por gravedad son operadas con frecuencia a las menores velocidades de gas posibles. Desafortunadamente, a medida que la velocidad disminuye, el tamaño de la cámara debe aumentar. En realidad, la velocidad del gas debe ser lo suficientemente baja para evitar que el polvo se vuelva a encarrilar, pero no tan baja que la cámara se vuelva irrazonablemente grande.³ La figura 5.1-10 presenta una curva de eficiencia de recolección fraccionaria típica para cámaras de sedimentación.² El impacto de la densidad de las partículas se ilustra en la figura 5.1-11.³ Las partículas más densas de óxido férrico, con una gravedad específica de 4.5, son recolectadas más eficientemente que el polvo de cuarzo cuya gravedad específica es 2.6.^{2,3}

5.1.2.2 Separadores por Momento

Debido a que estos dispositivos utilizan la inercia además de la gravedad, los separadores por momento alcanzan eficiencias cercanas al 20 por ciento para MP_{10} . La eficiencia de recolección para los separadores por momento aumentará a medida que la velocidad del gas aumente. La caída de presión y los costos de operación correspondientes también aumentarán con la velocidad del gas, por lo tanto se debe escoger la velocidad óptima para balancear la eficiencia y los costos de operación.^{2,3} La figura 5.1-12 presenta datos de eficiencia para separadores de momento que recolectan cenizas flotantes.

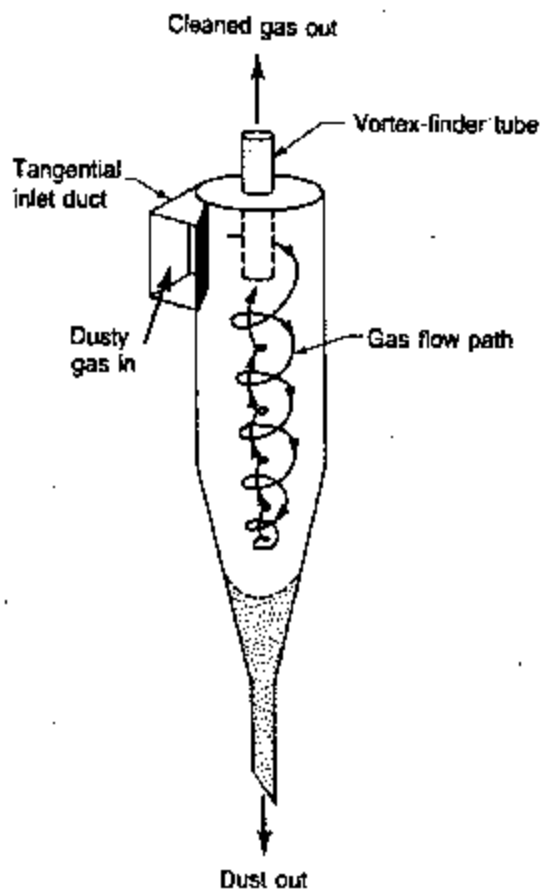


Figure 5.1-6. Illustration of the Double Vortex Within a Cyclone (Reference 1).

Figura 5.1 -6 Ilustración Del Doble Vortex Dentro De Un Ciclone

Traducción de Términos

Cleaned gas out	Gas limpio de salida	Vortex-finder tube	Vortex-Tubo localizador
Tangential inlet duct	Ducto tangencial de entrada	Gas flow path	Camino del flujo de gas
Dust out	Polvo de salida		

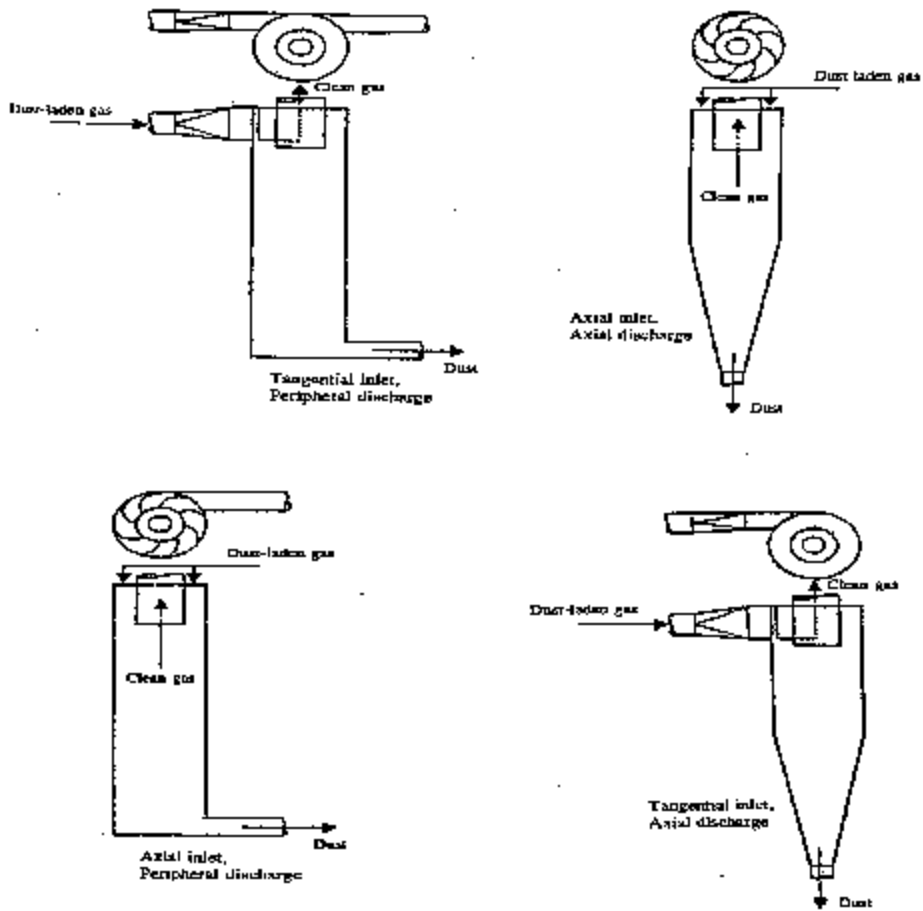


Figure 5.1-7. Four Basic Cyclone Types (adapted from Reference 2).

Figura 5.1-7. Cuatro Tipos de Ciclón Básicos (adaptados de la Referencia 2)

Traducción de términos

Clean gas	Gas limpio	Axial inlet	Entrada axial
Dust-laden gas =	Gas cargado de polvo	Axial discharge =	Descarga axial
Tangential inlet =	Entrada tangencial	Dust =	Polvo
Peripheral discharge	Descarga periférica		

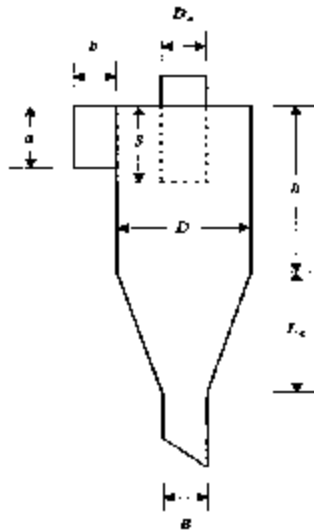


Figure 5.1-8. Standard Dimensions of a Cyclone (Reference 6).

Figura 5.1-8. Dimensiones Estándares de un Ciclón (Referencia 6).

Tabla 5.1-1 Características de los Ciclones Comunes

Dimensión del Ciclón	Tipo de Ciclón					
	Alta Eficiencia		Convencional		Alto Rendimiento	
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)
Diámetro del Cuerpo, D/D	1	1	1	1	1	1
Altura de la Entrada, a/D	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Ancho de la Entrada, b/D	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Diámetro de la Salida del Gas, D_g/D	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Longitud del Localizador del Vértice, S/D	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Longitud del Cuerpo, h/D	1.5	1.4	2	1.75	1.5	1.7
Longitud del Cono, L_c/D	2.5	2.5	2	2	2.5	2
Diámetro de la Salida del Polvo, B/D	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

Nota: Los diversos diseños de los ciclones corresponden a las siguientes referencias de la literatura: los ciclones I y V de la referencia 7, los ciclones II, IV, y VI de la referencia 8, y el ciclón III de la referencia 9.

5.1.2.3 Separadores con Ayuda Mecánica

La figura 5.1-13 proporciona curvas de eficiencia para dos tipos de separadores con ayuda mecánica.² Los separadores con ayuda mecánica son capaces de alcanzar eficiencias de recolección cercanas al 30 por ciento para la MP_{10} . Los separadores con ayuda mecánica por lo general producen más fuerza centrífuga que los ciclones, pero poseen tiempos de residencia más cortos y un menor re-encarrilamiento como resultado de la turbulencia. Una ventaja principal de su tamaño compacto.⁴

5.1.2.4 Ciclones

Existen muchos factores que afectan la eficiencia de recolección de los ciclones. Se ha demostrado que la eficiencia del ciclón por lo general aumenta con los siguientes parámetros: (1) el tamaño y/o densidad, (2) la velocidad en el ducto de entrada, (3) la longitud del cuerpo del ciclón, (4) el número de revoluciones del gas en el ciclón, (5) la relación del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro de la salida del gas, (6) la carga de polvo, y (7) la uniformidad de la pared interior del ciclón.¹¹

La eficiencia del ciclón disminuye con aumentos en los siguientes parámetros: (1) la viscosidad del gas, (2) el diámetro del cuerpo del ciclón, (3) el diámetro de la salida del gas, (4) la superficie del ducto de entrada del gas, y (5) la densidad del gas. Otra causa común de la falta de efectividad de un ciclón es la fuga de aire hacia la salida del polvo. En específico, esto disminuirá la eficiencia para las partículas finas.¹¹

Se han desarrollado varios métodos para estimar la eficiencia de un ciclón. La mayoría de las teorías ciclónicas utilizan un término para el tamaño de las partículas, llamado el "tamaño de corte de las partículas", que define el tamaño de las partículas para una eficiencia de recolección específica. Las partículas mayores que el tamaño de corte serán recolectadas con una eficiencia mayor que la especificada, y las partículas más pequeñas serán recolectadas con menor eficiencia. El tamaño de corte de las partículas generalmente corresponde al 50 por ciento de la eficiencia de recolección y se denomina " d_{50} ." Otro parámetro ciclónico importante para designar el tamaño es el "tamaño crítico de las partículas". Las partículas de este tamaño y mayores son capturadas con el 100 por ciento de eficiencia. turbulencia dentro del ciclón. Dos tipos generales de curvas de eficiencia fraccionaria para ciclones se muestran en la figura 5.1-14; la primera curva "A" es hiperbólica, la segunda curva "B" es de forma sigmoide. La mayoría de las teorías de eficiencia ciclónica producirán una curva similar a una de las dos mostradas en esta figura.^{6,15}

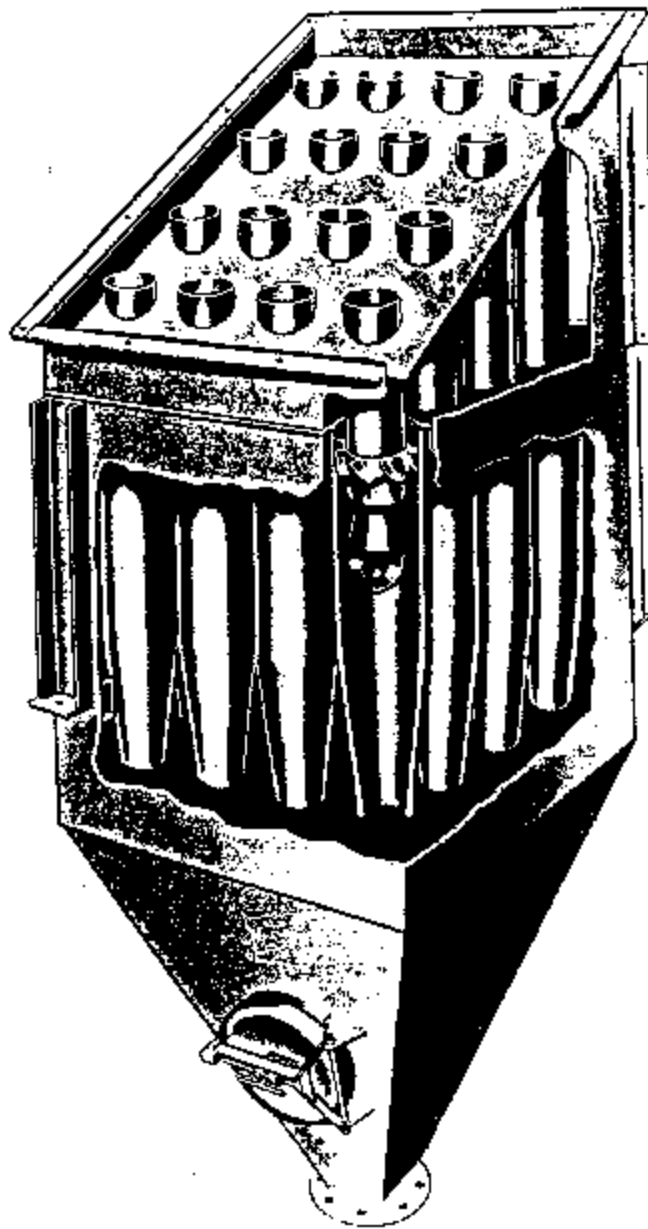


Figure 5.1-9. Typical Multiple Cyclone (Reference 3).

Figura 5.1-9 Ciclon Multiple Tipico (Referencia 3)

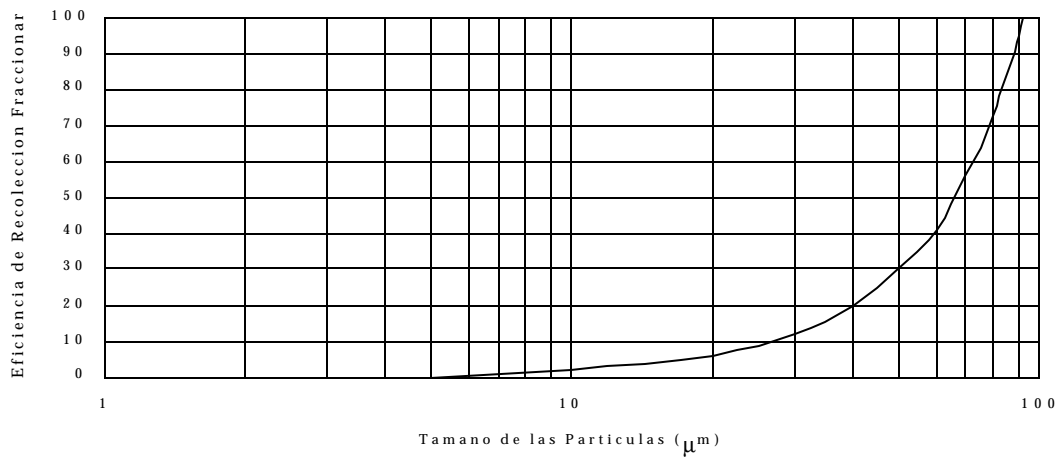
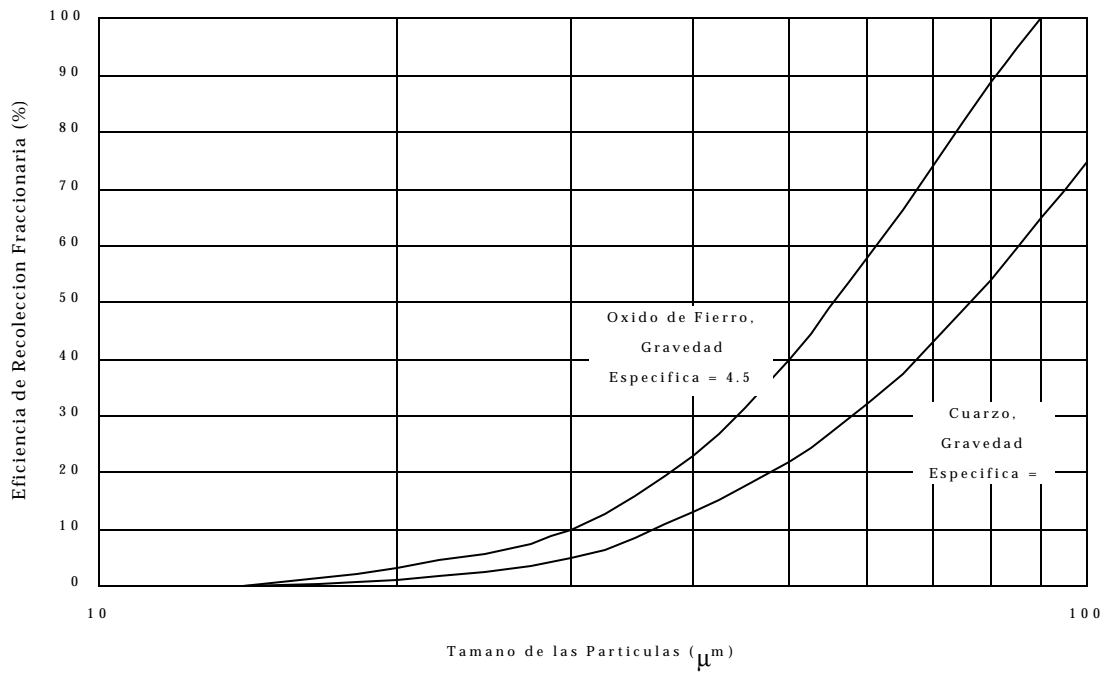


Figura 5.1 -10 Curva tipica de eficiencia de recolección fraccionada para camara de



Sedimentación

Figura 5.1-11 Impacto de la densidad de patricula en la eficiencia de recolección fraccionada para camara de Sedimentación (referencia 3)

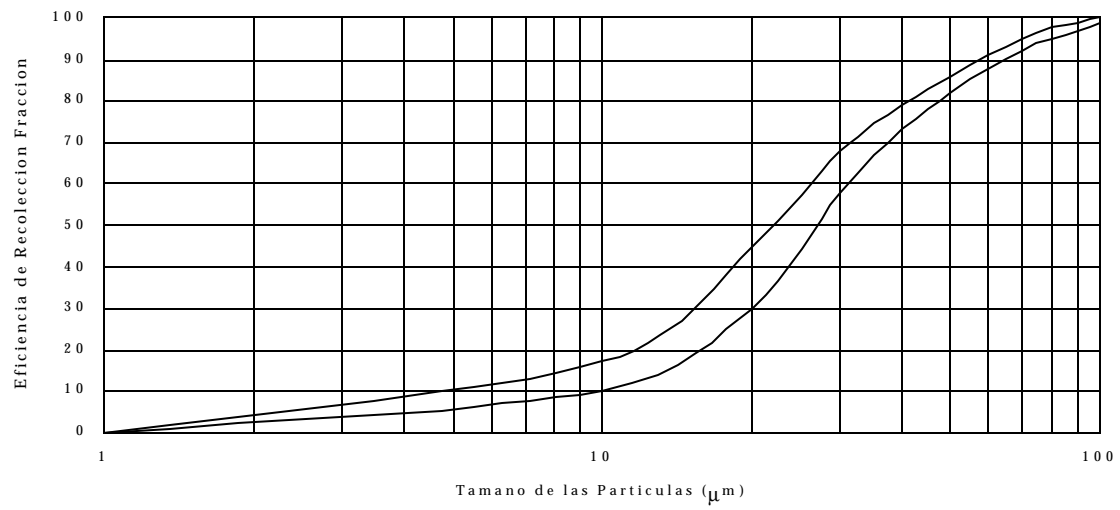
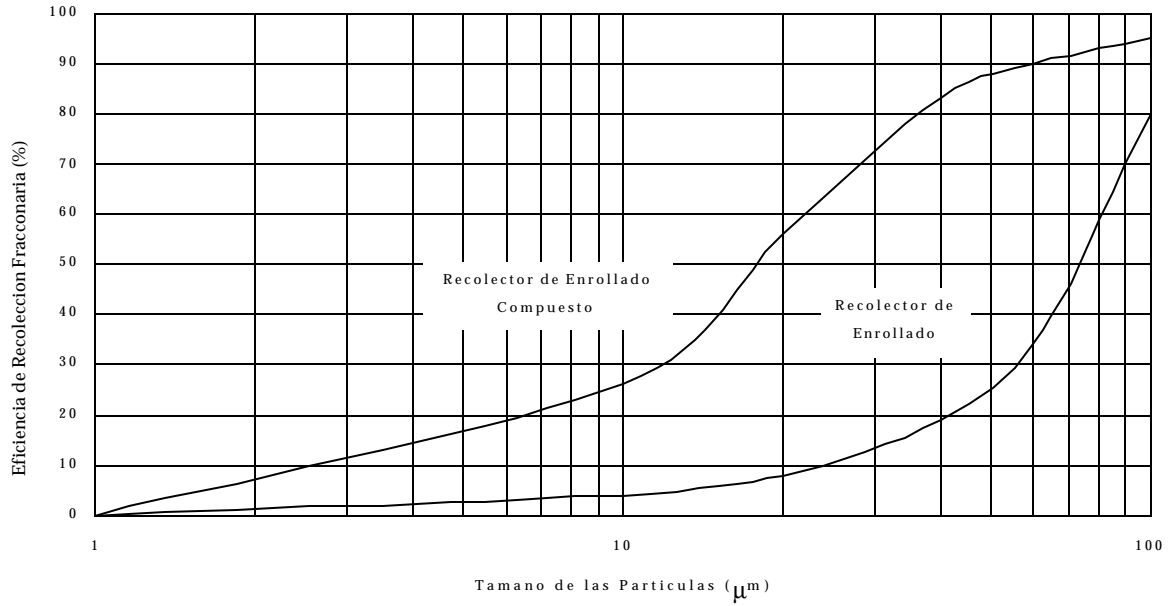
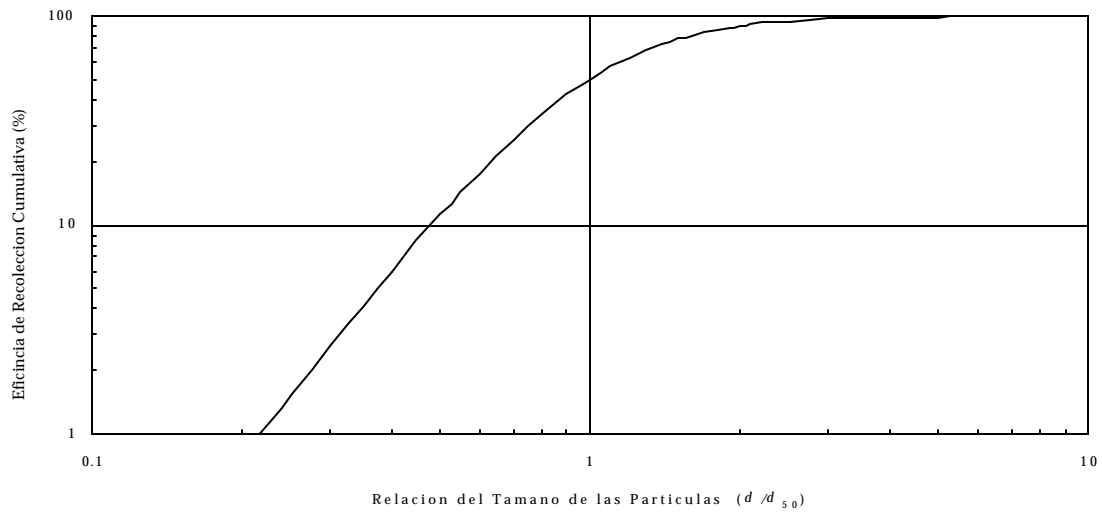


Figure 5.1-12 Curva Típica de Eficiencia de Recolección Fraccionada para un Separador de Momento*

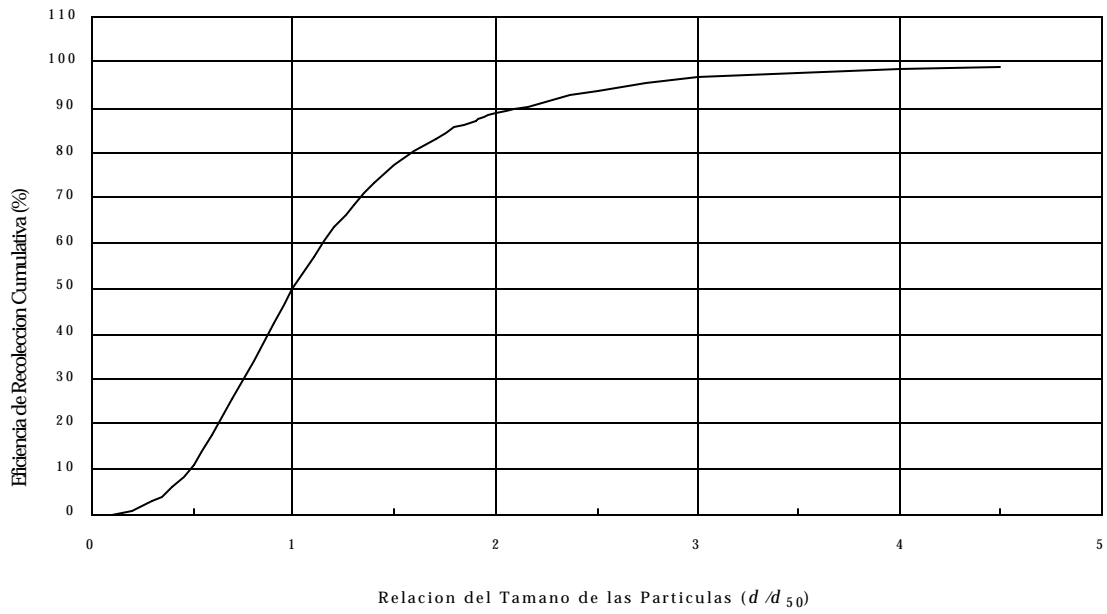
Figure 5.1-13 Curva Típica Eficiencia de Recolección Fraccionada para Separador con ayuda Mecánica*

* (Referencia 2)





A: Escala Log-log



B: Escala lineal

Figura 5.1-14 Curva de Eficiencia Tipica. Ciclón en Escalas Log-log (A) y Lineal (B) (Referencias 6 y 15)

Lapple¹² desarrolló un modelo relativamente sencillo para predecir la eficiencia de un ciclón que fue derivado de la teoría del movimiento de las partículas y requiere una suposición sobre el número de revoluciones que el gas efectúa dentro del ciclón. Leith and Licht¹³ desarrollaron una teoría de eficiencia que estaba basada en una solución aproximada a las ecuaciones para el movimiento teórico de las partículas usando la suposición de turbulencia dentro del ciclón. Ambas teorías producen una curva de eficiencia ciclónica de tipo "A" en la figura 5.1-14. Más recientemente, Lozia y Leith^{14,15} desarrollaron una teoría de eficiencia ciclónica basada en el movimiento teórico de las partículas que usa coeficientes derivados empíricamente. Esta teoría produce una curva de eficiencia ciclónica de tipo "B" en la figura 5.1-14. Se demostró que la teoría de Lozia y Leith predice la eficiencia ciclónica mejor que las teorías de Lapple, y Leith y Licht, usando datos de pruebas de laboratorio para ciclones disponible en la literatura.¹⁵ La teoría de Lapple y la teoría de Lozia y Leith se discuten con mayor detalle a continuación.

De acuerdo a la teoría de Lapple,¹² el d_{50} se calcula como sigue:

$$d_{50} = [9 \cdot b / (2 B N V_i (D_p - D_g))]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 5.1-1)}$$

donde d_{50} es el diámetro de las partículas recolectadas con una eficiencia del 50 por ciento (en pies), μ es la viscosidad del gas (en libras/segundo-pie), b es el diámetro de la entrada del ciclón (en pies), N es el número de revoluciones del gas en el ciclón (estimado entre 0.3 y 10, con un valor promedio aproximado de 5¹⁶), V_i es la velocidad del gas en el ducto de entrada (en pies/segundo), D_p es la densidad de las partículas (en libras/pie cúbico), y D_g es la densidad del gas (en libras/pie cúbico). La limitación respecto a esta ecuación consiste en que N , el número de revoluciones del gas dentro del ciclón, es desconocido y las predicciones para este valor no toman en cuenta el diseño individual del ciclón u otras condiciones de operación. Además, la teoría de Lapple no permite el cálculo de la eficiencia de recolección para otros tamaños de partículas.

La teoría de eficiencia desarrollada por Lozia and Leith^{14,15} para predecir la eficiencia de recolección fraccionaria utiliza una ecuación, denominada "ecuación logística", que aproxima una curva de eficiencia con forma sigmoide:

$$EC = 1 / (1 + (d_{50}/d)^\beta) \quad \text{(Ecuación 5.1-2)}$$

donde EC es la eficiencia de control (expresada como una fracción) para una partícula de diámetro d , d_{50} es el diámetro de la partícula recolectada con un 50 por ciento de eficiencia, y beta (β) es un coeficiente. Lozia y Leith desarrollaron una ecuación para predecir β a partir de las dimensiones del ciclón usando datos de pruebas de laboratorio en un ciclón de 25 cm de diámetro:¹⁵

$$\ln \beta = 0.62 - 0.87 \ln (d_{50}) + 5.21 \ln (ab/D^2) + 1.05 (\ln (ab/D^2))^2 \quad \text{(Ecuación 5.1-3)}$$

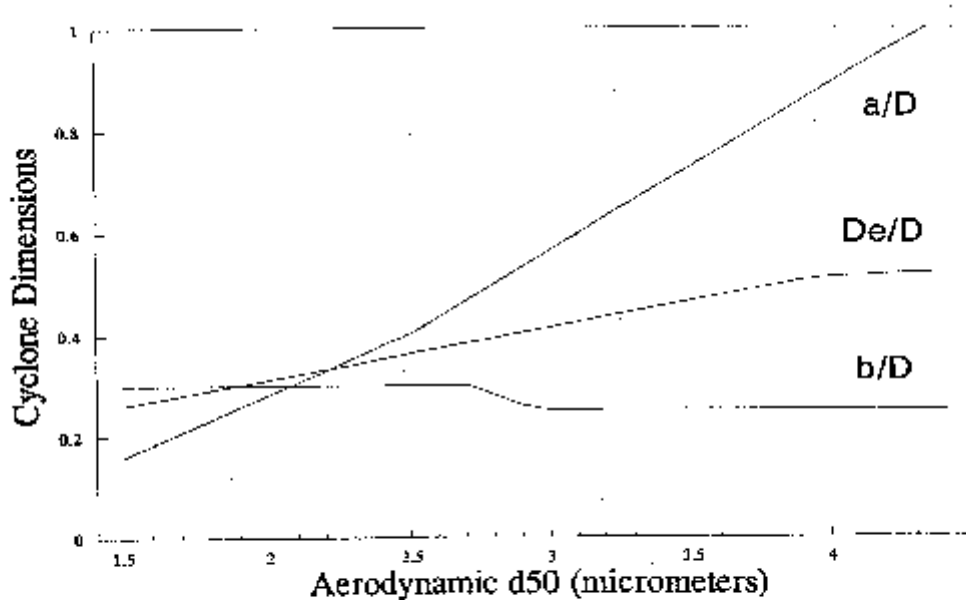


Figure 5.1-15. Dimensions of the Cyclone Inlet and Outlet Ducts for an Optimized Cyclone Design, According to the Iozia and Leith Cyclone Efficiency Theory (Reference 17).

Figura 5.1-15 Dimensiones de los Ductos de Entrada y de Salida del Ciclón para un Diseño Optimizado de Ciclón, de acuerdo a la Teoría de Eficiencia Ciclónica de Iozia y Leith (referencia 17).

donde d_{50} , tal como en el caso anterior, se expresa en centímetros; a es la altura del ducto de entrada del ciclón, b es la amplitud del ducto del ciclón, y D es el diámetro del ciclón. También se desarrolló una ecuación para predecir el d_{50} :

$$d_{50} = \{(9 \mu Q)/B z D_p V_{t_{\max}}^2\} \quad (\text{Ecuación 5.1-4})$$

donde μ es la viscosidad del gas, Q es el flujo del gas, z es aproximadamente igual a la altura del ciclón menos la altura de la extensión del ducto de salida hacia el interior del ciclón, D_p es la densidad de las partículas, y $V_{t_{\max}}^2$ es la velocidad tangencial máxima del gas dentro del ciclón y se calcula como sigue:

$$V_{t_{\max}}^2 = 6.1 V_i \{(ab/D^2)^{0.61} (De/D)^{-0.74} (H/D)^{-0.33}\} \quad (\text{Ecuación 5.1-5})$$

donde V_i es la velocidad del gas en el ducto de entrada; a , b , y D son como en el caso anterior; De es el diámetro del ducto de salida del ciclón; y H es la altura total del ciclón ($h + L_o$).

Iozia y Leith usaron su teoría para la eficiencia ciclónica para optimizar el diseño del ciclón.¹⁷ Usando un programa computarizado para la optimización de ciclones, desarrollaron curvas para predecir las dimensiones ciclónicas de un ciclón con la mayor eficiencia posible para una situación determinada.¹⁸ La figura 5.1-15 muestra las dimensiones de los conductos de entrada y de salida necesarias para lograr este

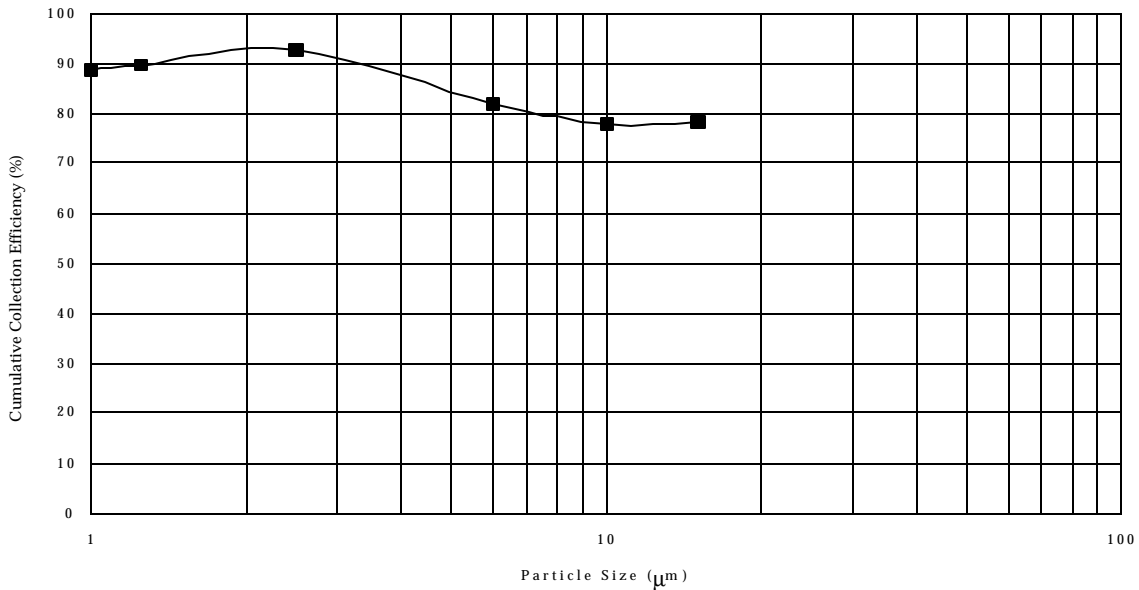


Figure 5.1-16. Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para Ciclones Múltiples en una Caldera Alimentada con Aceite Residual (referencia 5).

diseño optimizado de ciclón.¹⁷ Las predicciones de lozia y Leith , Sin embargo, no han sido probadas en escala total de aplicaciones industriales.

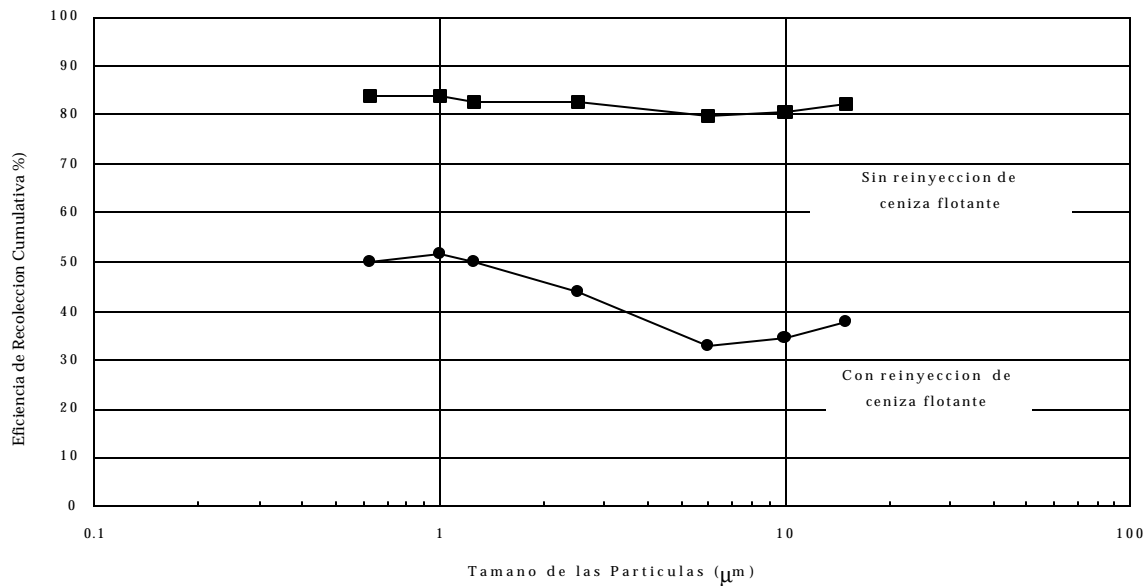
Para ciclones sencillos, los ciclones convencionales pueden remover partículas de 10 micras con 85 a 90 por ciento de eficiencia, partículas de 5 micras a una eficiencia de 75 a 85 por ciento, y partículas de 2.5 micras con una eficiencia de 60 a 75 por ciento.⁶ Los ciclones sencillos de lata eficiencia pueden remover partículas de 5 micras con una eficiencia de hasta el 90 por ciento, con eficiencias más altas alcanzables para partículas mayores.¹ Los ciclones de alto rendimiento únicamente garantizan la remoción de las partícuolas mayor de 20 micras, aunque la recolección de partículas menores ocurre de hecho hasta cierto punto.¹⁹

Se reporta que los multiciclones logran una eficiencia desde el 80 por ciento hasta el 95 por ciento para partículas de 5 micras.^{1,5,19} En algunos casos, los ciclones múltiples han ido utilizados como dispositivos de recolección primaria.¹⁹ Los ciclones múltiples se usan con frecuencia como recolectores preliminares en operaciones indutriales de combustión. La figura 5.1-16 muestra la eficiencia de recolección para ciclones múltiples en una caldera que quema aceite. En muchas unidades de combustión industriales grandes, las emisiones de MP incluyen cantidades significantes de carbón que no fue quemado completamente. Para mejorar la eficiencia de estas unidades, la ceniza flotante de los ciclones múltiples (u otros dispositivos de recolección previa) es inyectada de nuevo hacia dentro de la unidad de combustión.

Esta operación, conocida como reinyección de ceniza flotante, aumenta la carga de partículas considerablemente, y conduce a menores eficiencias de recolección para partículas pequeñas.⁵ La figura 5.1-17 ilustra este efecto, mostrando curvas de eficiencia para ciclones múltiples en calderas de carbón y de madera, con y sin inyección de ceniza flotante.

5.1.3 Aplicabilidad

Los recolectores preliminares mecánicos tienen muy pocas limitaciones en su aplicación como recolectores preliminares, aunque por lo general no son usados donde no existe MP grande. Los



Corteza de Madera

recolectores preliminares mecánicos pueden ser utilizados para tratar razones de flujo grandes y pequeñas y para remover un amplio rango de tamaños de partículas. Los recolectores mecánicos son sencillos en su diseño y económicos en su adquisición y operación. Además, su uso reducirá la carga de partículas en los dispositivos de recolección primaria lo cual prolongará su vida de operación.²

La gran mayoría de los polvos son adecuados para ser recolectados por recolectores preliminares mecánicos no serían efectivos para las corrientes de gas donde el grueso de la MP es pequeño (<3 micras). Los recolectores mecánicos pueden ser construidos a partir de varios materiales y son capaces de operar bajo cualquier condición que los materiales de construcción permitan. Típicamente, cualquier industria que usa dispositivos de control grandes y relativamente costosos, tales como los filtros de tela, o los precipitadores electrostáticos (PES), también emplearán recolectores preliminares mecánicos. Los ciclones múltiples son los dispositivos más comunes para aplicaciones industriales, especialmente para calderas y otras unidades de combustión que generan partículas más pequeñas. Algunas industrias también usan recolectores mecánicos para la recuperación de producto o catalizadores, ya que estos recolectores no son destructivos y permiten la reventa o reutilización del material recuperado.²

Figura 5.1-17. Datos de Eficiencia de Recoleccion Cumulativa para Ciclones Multiples en Calderas de Carbón y Madera, Con y Sin Reinyeccion de Cenizas Flotantes (referencia 5).

5.1.4 Costos de Precolectores

Los costos de instalación y operación de un pre-colector mecánico incluyen costos tanto capitales como anuales. Los costos capitales son todos los costos iniciales relacionados al equipo recolector e instalación. Los costos anuales son los costos anuales directos de operación del dispositivo, además de los costos indirectos tales como; recuperación de capital; e impuestos, seguro, y cargos de administración. Las siguientes secciones discuten los costos capitales y anuales para los recolectores mecánicos, con referencia al tercer trimestre de 1995 a menos que se indique lo contrario. En los costos de estos dispositivos. Puesto que los ciclones son los precolectores mecánicos más comunes y por lo general los más efectivos para aplicaciones industriales, esta sección se enfocará únicamente en los costos de estos dispositivos.

5.1.4.1 Costos de Capital de los Ciclones

La inversión capital total (ICT) para los ciclones incluye todos los costos de capital iniciales, tanto directos como indirectos. Los costos de capital directos son los costos del equipo adquirido (CEA), y los costos de instalación (soportes, etc.). Los costos indirectos se relacionan a la instalación e incluyen la ingeniería, la construcción, los contratistas, el inicio, las pruebas, y las contingencias. El CEA se calcula basándose en las especificaciones del ciclón. Los costos de instalación directos e indirectos se calculan como factores del CEA. Para los ciclones, los costos de instalación son generalmente bajos, suponiéndose que la combinación de los costos directos e indirectos sea aproximadamente el 25 por ciento del CEA. Así, el CEA para ciclones se calcula típicamente como 1.25 multiplicado por el CEA.²⁰

El parámetro más importante para determinar el tamaño de los ciclones es la superficie del ducto de entrada (A), que puede ser calculado a partir de las ecuaciones siguientes:¹⁹

$$A = Q/V_i \quad (\text{Ecuación 5.1-6})$$

$$A = (Q(D_p - D_g)/\mu)^{1.33} d_c^{2.67} \quad (\text{Ecuación 5.1-7})$$

donde A es la superficie del ducto de entrada del ciclón (pies cuadrados), Q es la velocidad de flujo del gas (en ACFM, pies cúbicos/minuto), V_i es la velocidad en el ducto de entrada del ciclón (pies/minuto), D_p es la densidad de las partículas (en libras/pie cúbico), D_g es la densidad del gas (en libras/pie cúbico), μ es la viscosidad del gas (en libras/pie-segundo), y d_c es el tamaño crítico de las partículas (en micras).

Al seleccionar una velocidad del gas en el ducto de entrada (V_i) para la ecuación 5.1-2, la superficie del ducto de entrada puede ser determinada y la ecuación 5.1-3 puede ser resuelta para el tamaño crítico de las partículas (d_c). El tamaño crítico de las partículas se define para esta ecuación como la partícula más pequeña que puede recolectar el ciclón con una eficiencia del 100 por ciento. De manera similar, la velocidad del gas en el ducto de entrada puede ser calculado para un tamaño crítico de las partículas determinado.¹⁹

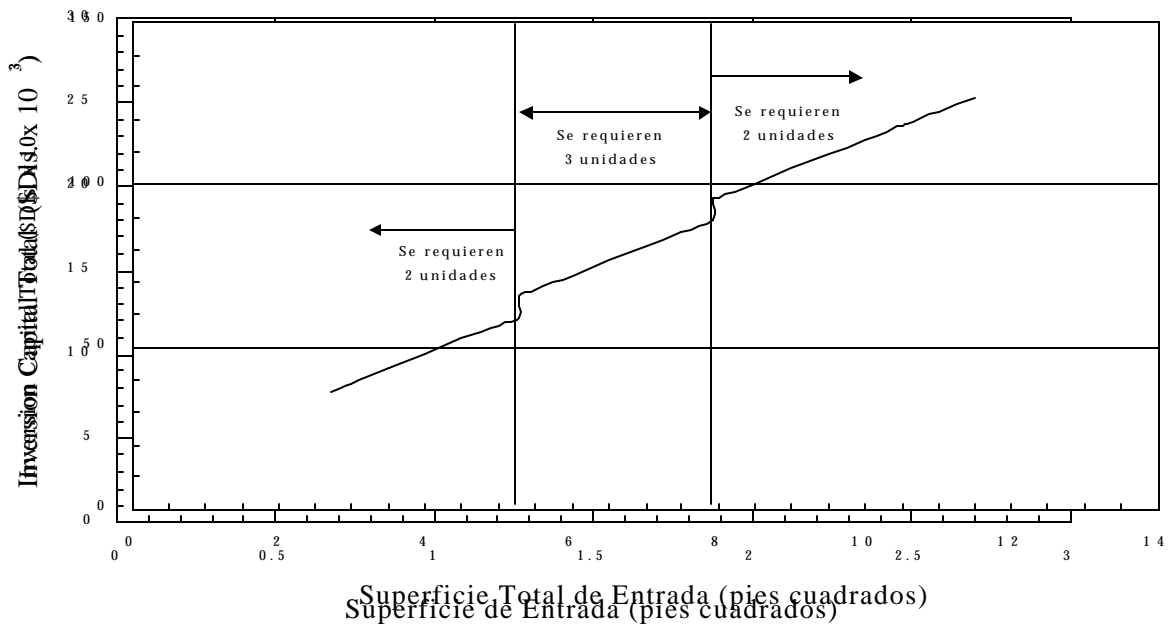


Figura 5.1-19. Inversión Capital Total vs. Superficie del Ducto de Entrada, para una Superficie del Ducto > 2.64 pies cuadrados (referencia 19).
Figure 5.1-18. Inversión Capital Total vs. Superficie del Ducto de Entrada para 0.2 pies cuadrados < Superficie del Ducto < 2.64 pies cuadrados (referencia 19).

Los costos de los ciclones se basan en la superficie del ducto de entrada, e incluyen el ciclón, el ventilador, el motor, la tolva (o barril), y el cierre rotatorio de aire. La figura 5.1-18 presenta una curva de costos para los ciclones con superficies del ducto de entrada entre 0.2 y 2.64 pies cuadrados. El escalón en esta curva a 0.35 pie cuadrado es un resultado del hecho de que los ciclones con superficies del ducto de entrada menores de 0.35 pie cuadrado no requieren cerraduras de aire, que son *dampers* que evitan que el gas en el ciclón entre en la tolva para polvo durante la remoción del polvo.¹⁹ Para los ciclones con superficies del ducto de entrada que requieran ser mayores de 2.64 pies cuadrados, la superficie total del ducto de entrada debe ser dividida igualmente entre 2 o más ciclones, cada uno con superficies del ducto de entrada menores de 2.64 pies cuadrados.

La figura 5.1-19 proporciona una curva de costos para los ciclones con superficies totales del ducto de entrada mayores de 2.64 pies cuadrados.¹⁹ Los escalones en esta curva indican las velocidades de flujo a las cuales se vuelve necesario un ciclón adicional. La función del escalón se aproxima a una línea recta. Las curvas de costo en este documento son para los ciclones de acero de carbón; otros materiales pudieran incrementar los costos.²⁰

Los costos de capital obtenidos de este documento pueden ser escalados a valores más actualizados a través del uso de los Índices Vatavuk de Costos para el Control de la Contaminación del Aire, *Vatavuk Air Pollution Control Cost Indexes (VAPCCI)*, which are published monthly and updated quarterly in *Chemical Engineering* magazine. Los *VAPCCI* actualizan el CEA y, puesto que los costos de

capital se basan únicamente en el CEA, los costos de capital pueden ser ajustados fácilmente usando los *VAPCCI*. Para escalar los costos de capital de un año ($\text{Costo}_{\text{viejo}}$) a otro año más reciente ($\text{Costo}_{\text{nuevo}}$), se puede usar una proporción sencilla, tal como la siguiente:²¹

$$\text{Costo}_{\text{nuevo}} = \text{Costo}_{\text{viejo}} \left(\frac{\text{VAPCCI}_{\text{nuevo}}}{\text{VAPCCI}_{\text{viejo}}} \right) \quad (\text{Ecuación 5.1-8})$$

El *VAPCCI* para recolectores mecánicos del cuarto trimestre de 1996 fue 103.3.

5.1.4.2 Costos Anuales de los Ciclones

Los costos totales anuales para un ciclón consisten en costos tanto directos como indirectos. Los costos anuales directos son los asociados con la operación y el mantenimiento del ciclón. Estos incluyen la mano de obra y los materiales de mantenimiento, la electricidad y el desecho del polvo. Los costos típicos del desecho de polvo no peligroso son típicamente de \$20-\$30 dólares/tonelada, excluyendo los costos de transportación. El desecho de los polvos peligrosos puede costar hasta diez veces más.²² Se supone que los ciclones no tienen necesidad de la mano de obra de un operador o un supervisor.²⁰

Los costos indirectos anuales para los ciclones incluyen a los impuestos, la aseguranza, los costos administrativos, el *overhead*, y la recuperación del capital. Todos estos costos a excepción del *overhead* dependen de la ICT. La tabla 5.1-2 proporciona los parámetros que impactan los costos anuales y las estimaciones de los valores típicos. La tabla 5.1-3 proporciona los factores de costo anuales para los ciclones.²⁰ Los costos anuales son muy específicos del sitio y, por lo tanto, difíciles de generalizar.

5.1.5 Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios de Pre-colectores

Los impactos ambientales secundarios de la operación de los ciclones se relacionan al consumo de energía y la generación de residuos sólidos. Las demandas de energía para los ciclones consisten en los requisitos de electricidad para la operación de los ventiladores. La potencia de ventilador necesaria para un ciclón específico depende de la caída de presión y puede estimarse con las ecuaciones siguientes:¹⁹

$$P = 2.36 \times 10^{-7} (V_1^2) \quad (\text{Ecuación 5.1-9})$$

$$\text{Potencia del ventilador (kilowatt-hora/año)} = 1.81 \times 10^{-4} (Q)(P)(t) \quad (\text{Ecuación 5.1-10})$$

donde P es la caída de presión del ciclón (en pulgadas de agua), V_1 es la velocidad del gas en el ducto de entrada (en pies/minuto), Q es la velocidad de flujo del gas (en *ACFM*, pies cúbicos/minuto), y t es el tiempo de operación (en horas/año).

El polvo que es recogido en los recolectores mecánicos puede ser vendido o reciclado si tiene algún valor intrínseco o si puede ser reciclado para uso en otros materiales, tales como el concreto. De otra manera, la ceniza flotante debe ser desechada. La mayoría de los polvos inertes y no peligrosos

pueden ser desechadas en un relleno sanitario. Los polvos que son peligrosos o reactivos típicamente requerirán tratamiento o desecho en un relleno seguro.

Tabla 5.1-2. Parámetros de Costo Anuales para los Ciclones (referencia 9).

Parámetro	Descripción	Valores Típicos
Parámetros de Costo Directos		
Factor de operación (FO)	Horas de operación del ciclón por año	8,640 hr/yr
Mano de obra de mantenimiento (MM)	Salario por mano de obra de mantenimiento	\$14.00/hr ^b
Factor de turno de mantenimiento (TM)	Fracción del turno de mantenimiento del ciclón	0.25 ^b
Factor de materiales de mantenimiento (FM)	Fracción del costo de mano de obra de mantenimiento	1.0 ^b
Tarifa de electricidad (ER)	Costo de electricidad	\$0.07/kW-hr ^a
Costo de desecho del polvo (DP)	Costo de desecho del polvo	\$20-\$30/ton ^a
Parámetros de Costo Indirectos		
Factor de <i>overhead</i> (F ₋)	Fracción de mano de obra total y costos de MM	0.60 ^b
Tasa de Interés Anual (I)	Costo de oportunidad del capital	7 percent ^b
Vida de operación (n)	Vida de operación anticipada del ciclón	20 years ^b
Factor de recuperación del capital (FRC)	Función de (n) y (I)	0.0944 ^c
Impuestos (Impuestos)	Fracción de la ICT ^d	0.01 ^b
Aseguranza (SEG)	Fracción de la ICT ^d	0.01 ^b
Costos administrativos (AC)	Fracción de la ICT ^d	0.02 ^b

^a Estimados para 1996 en base a información disponible en la actualidad.

^b Presupuestos basados en las formas de trabajo "CO\$T-AIR" *Control Cost Spreadsheets* (referencia 20).

^c El factor de Recuperación del Capital se calcula con la fórmula siguiente: $CRF = \{I(1 + I)^n\} \div \{(1 + I)^n - 1\}$, donde I = tasa de interés (fracción) y n = vida de operación (años).

^d La inversión de capital total (ICT) puede ser escalada hasta los valores actuales usando los Índices de Costo Vatavuk para el Control de la Contaminación del Aire, *Vatavuk Air Pollution Control Cost Indexes (VAPCCI)*, descritos en la sección 5.1.4.1.

Tabla 5.1-3. Factores de Costo Anuales para los Ciclones (referencia 20).

Costo de los parámetros	Fórmula	Factor
Costos Directos		
Mano de obra de mantenimiento (MO)	$(FO) \times (MM) \times (TM)$	A
Materiales de mantenimiento (MM)	$(FM) \times (MO)$	A
Electricidad (E)	Potencia del ventilador \times (TE)	E
Desecho del polvo (D)	$(DP) \times$ Toneladas por año	<u>D</u>
Costo Directo (CD)		2 A + E + D
Costos Indirectos		
<i>Overhead</i>	$(OV) \times (MO + MM)$	1.2 A
Recuperación del capital	$(FRC) \times (ICT)$	0.0944 ICT
Impuestos	$(IMPUESTOS) \times (ICT)$	0.01 ICT
Aseguranza	$(SEG) \times (ICT)$	0.01 ICT
Costos administrativos	$(CA) \times (ICT)$	<u>0.02 ICT</u>
Total Indirect Cost (IC)		1.2 A + 0.1344 ICT
Costo Anual Total (DC + IC)		<u>3.2 A + 0.1344 ICT + E + D</u>

Nota: Estos valores también se describen en la tabla 5.1-2.

5.1.6 Acondicionamiento del Gas del Tubo de Escape

Se utiliza el acondicionamiento del gas para modificar las características de la corriente de gas y partículas para mejorar la remoción de partículas en el dispositivo de recolección primaria. El acondicionamiento del gas del tubo de escape en las plantas generadoras de energía alimentadas con carbón es la aplicación más difundida de esta práctica. Por lo general, el acondicionamiento del gas del tubo de escape involucra el uso de sustancias químicas que son añadidas a la corriente del gas para mejorar las propiedades de la ceniza flotante y las condiciones eléctricas en los precipitadores electrostáticos. Véase la sección 5.2 para obtener una discusión detallada de la operación de los precipitadores electrostáticos (PES). El rendimiento de los filtros de tela y los absorbentes es mucho menos dependiente de la composición química del gas y las partículas, así que estos dispositivos típicamente no emplean el acondicionamiento químico para la remoción de las partículas. Cualquier acondicionamiento del gas para filtros de tela o absorbentes generalmente consiste en controlar la temperatura y la humedad de la corriente de gas. Por lo tanto, en esta sección sólo se discutirá el acondicionamiento del gas del tubo de escape para los PES.

El acondicionamiento del gas del tubo de escape es usado con mayor frecuencia para proveer nuevas partes que no eran disponibles al tiempo de fabricación de los PES que no están operando a la altura de la eficiencia de diseño. Esto ocurre frecuentemente como resultado del cambio por carbón de bajo azufre,^{1,11} que produce una ceniza flotante de alta resistividad que es difícil de recolectar en un PES. La eficiencia de recolección de un PES depende de la fuerza del campo eléctrico y de la densidad de iones; las propiedades adhesivas y cohesivas de la ceniza flotante; y el tamaño de las partículas y la distribución de los tamaños. El acondicionamiento del gas del tubo de escape puede influenciar todos estos parámetros.²³ Los agentes de acondicionamiento pueden mejorar la eficiencia de recolección de los PES con uno o más de los mecanismos siguientes:²³

- C Adsorber sobre la superficie de la ceniza flotante y reducir la resistividad de la superficie
- C Adsorber sobre la ceniza flotante y cambiar las propiedades de adherencia / enlace
- C Aumentar la concentración de partículas ultra finas para el mejoramiento de las cargas espaciales
- C Aumentar el voltaje de sobre chispa del gas de escape (reducir la corona inversa)
- C Aumentar el tamaño promedio de las partículas
- C Disminuir el punto de rocío ácido en el gas del tubo de escape

Los agentes comunes para el acondicionamiento incluyen el trióxido de azufre (SO₃), el amoníaco, los compuestos de amoníaco, las aminas orgánicas, y los alcalíes secos.¹¹

El efecto del acondicionamiento del gas, del tubo de escape sobre la eficiencia de recolección es difícil de cuantificar, porque difiere bastante entre aplicaciones. En algunos casos, una pequeña dosis de agente acondicionador proporcionará una mejoría significativa en la eficiencia de recolección mientras que dosis subsecuentemente mayores demuestran muy poca mejoría adicional. Otros usuarios han reportado aumentos constantes en la eficiencia de recolección al ir aumentando la dosis.²³ En la publicación *Flue Gas Conditioning* (referencia 23), una variedad de usuarios de acondicionadores SO₃ reportó aumentos en la eficiencia de recolección, en un rango del 1.7 por ciento hasta el 18 por ciento, con dosis de SO₃ en un rango de 5 ppmv (partes por millón por volumen) a 64 ppmv.²³

5.1.6.1 Acondicionamiento con Trióxido de Azufre

El agente acondicionador de gases utilizado más comúnmente para las plantas generadoras de energía en los Estados Unidos es el SO₃. El trióxido de azufre es inyectado dentro de la corriente del gas después del pre-calentamiento de aire, que es un intercambiador de calor que utiliza los gases calientes

del tubo de escape para precalentar el aire de combustión de entrada. El ácido sulfúrico es en realidad el agente activo en el acondicionamiento. Casi todo el SO_3 es hidratado convirtiéndose en ácido sulfúrico a la temperatura y humedad de la corriente de gas del tubo de escape. El ácido sulfúrico tiene una fuerte afinidad por el agua y se disocia enseguida en dos iones hidrógeno y un ion sulfato en solución. Esta propiedad vuelve la solución altamente conductiva. El ácido sulfúrico también tiene una presión de vapor baja; como resultado, el ácido sulfúrico no se vaporiza fácilmente, aún de una solución concentrada a una fase diluida de vapor. Esta combinación de volatilidad baja y conductividad alta hacen al ácido sulfúrico muy efectivo en la reducción de la resistividad de la ceniza flotante.^{11,23}

El ácido sulfúrico reduce la resistividad de las partículas en los PES, estableciendo una capa de solución conductiva sobre la superficie de la partícula a través de la adsorción y/o condensación de ácido sulfúrico y agua. Una capa de solución ácida también se forma sobre las partículas que ya han sido recolectadas sobre la placa de recolección.^{11,23}

El trióxido de azufre utilizado para el acondicionamiento de gases por lo común se genera mediante uno de los cuatro métodos siguientes: 1) vaporización de una solución de ácido sulfúrico, 2) vaporización de SO_3 líquido, 3) vaporización de dióxido de azufre líquido (SO_2) y la oxidación catalítica a SO_3 , y 4) combustión de azufre líquido en el aire para producir SO_2 con oxidación a SO_3 subsiguiente. Los métodos 3 y 4 son los más confiables, siendo el método 3 el más económico.^{11,23}

Una dosis típica de SO_3 varía dentro de un rango de 5 a 30 *ppmv*, aunque la dosis puede ser tan alta como 70 *ppmv*. Una dosis de 20 *ppmv* puede disminuir la resistividad de la ceniza flotante en dos órdenes de magnitud.^{11,23}

La temperatura del gas del tubo de escape, la composición de MP de la corriente de gas, determinan qué tan efectivo será el SO_3 / ácido sulfúrico en la reducción de la sensibilidad. A temperaturas altas (>200°C), el ácido sulfúrico es menos efectivo por dos razones. Primero, las temperaturas por encima del punto de rocío ácido evitan que el ácido sulfúrico se adsorba o condense en cantidades apreciables sobre las partículas. Segundo, la conducción del volumen a través del grueso de las partículas se vuelve dominante sobre la superficie de conducción a temperaturas altas. Una capa conductiva de ácido sulfúrico sólo mejorará la conducción en la superficie. Si la MP incluye una cantidad grande de compuestos alcalinos, la MP reaccionará con el ácido para formar una capa de sales no conductiva. Una dosis mayor de SO_3 proporcionará ácido en exceso para adsorberse o condensarse sobre la superficie de la capa de sal.^{11,23}

Los usuarios del acondicionamiento por SO_3 han reportado problemas de corrosión, desactivación de catalizadores, y acondicionamiento en exceso. A temperaturas por debajo del punto de rocío ácido, el ácido sulfúrico se condensará en las tuberías que conducen a las boquillas de inyección. Esto puede conducir a la corrosión y la obstrucción de las líneas. Las instalaciones que confían en la oxidación catalítica del dióxido de azufre para producir SO_3 han descubierto que es necesario reponer el catalizador aproximadamente una vez al año. El acondicionamiento con dosis excesivas de ácido sulfúrico también puede acondicionar el gas excesivamente. En tales casos, la resistividad se vuelve demasiado baja y las partículas son encarriladas fácilmente. Además, el ácido puede formar una solución que adhiere a las partículas a las placas, haciéndolas difíciles de remover con un *rapping* normal.^{11,23}

5.1.6.2 Acondicionamiento con Amoníaco

El acondicionamiento con amoníaco ha sido demostrado como un agente efectivo para el acondicionamiento de gases para los PES que operan con carbones bajos en azufre. En Australia, el amoníaco es el agente acondicionador más popular, porque el carbón australiano produce una ceniza con una resistividad muy alta. En los Estados Unidos, el acondicionamiento con amoníaco se ha vuelto

importante con el aumento en el uso de carbones bajos en azufre, que está siendo usado para contrarrestar la generación de precursores de la lluvia ácida, tales como el SO_2 .^{11,23} El amoníaco también está siendo usado para optimizar la operación de los filtros de tela.²⁴ Ambas aplicaciones se discuten a continuación.

Acondicionamiento con Amoníaco en PES. En un PES, el amoníaco puede ser inyectado ya sea como un vapor o en solución antes o después de precalentar el aire. Mientras los mecanismos acondicionadores del amoníaco no han sido explicados en lleno, dos efectos particulares han sido reportados. El primer efecto es el aumento de la carga espacial en el PES. El amoníaco reacciona con el vapor de ácido sulfúrico en el gas del tubo de escape y forma un humo de partículas finas de sales de amonio. Las partículas finas aumentan la resistividad de la fase gaseosa en el espacio entre electrodos. La resistividad incrementada del gas aumenta la caída de voltaje y la fuerza de campo entre los electrodos, permitiendo la operación a voltajes más altos. El segundo efecto es un aumento en la cohesión de las partículas. La condensación del ácido sulfúrico en la presencia de sales de amonio contribuye a la adsorción de ácido y sales en el agua sobre la superficie de las partículas. La capa de depósitos en la superficie es muy pegajosa e incrementa la fuerza cohesiva entre las partículas sobre la placa de recolección, reduciendo el re encauzamiento.^{11,23}

Los efectos del amoníaco sobre la resistividad no han sido completamente aclarados. La evidencia ha demostrado que la ceniza flotante acondicionada con amoníaco puede tener una resistividad que es menor, igual, o mayor que la ceniza no acondicionada. El acondicionamiento con amoníaco es muy sensitivo a la temperatura, y es más efectivo a temperaturas bajas ($<110^\circ\text{C}$). Se ha demostrado que el acondicionamiento con amoníaco generalmente aumenta la eficiencia de recolección; sin embargo, el aumento en la eficiencia del PES no se correlaciona necesariamente con una disminución de la resistividad de la ceniza flotante. Los usuarios del amoníaco han reportado problemas de obstrucción de las boquillas y acumulación de depósitos sobre los electrodos de descarga.^{11,23}

Acondicionamiento con Amoníaco en Filtros de Tela.²⁴ Las adiciones de amoníaco al gas del tubo de escape que contiene SO_3 producen compuestos de sulfatos de amonio. Se ha descubierto que estos productos secundarios aumentan la adherencia de la ceniza, reduciendo de esta manera las emisiones de MP durante el ciclo de limpieza de los filtros de tela. La presencia de compuestos de sulfatos de amonio también produce una pastilla de polvo de mayor porosidad que resulta en una menor caída de presión en el filtro de tela. Además, el acondicionamiento con amoníaco reduce la corrosión y la falla de las bolsas que resulta por la condensación de SO_3 .

5.1.6.3 Acondicionamiento con Compuestos de Amonio

Los compuestos de amonio proporcionan un método de acondicionamiento con amoníaco más conveniente. El ácido sulfúrico de $(\text{NH}_3\text{SO}_2\text{OH})$, sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, y bisulfato de amonio $(\text{NH}_4\text{HSO}_4)$ son los compuestos de amonio más comunes para el acondicionamiento. Varios agentes de acondicionamiento patentado también contienen compuestos de amonio. Estos compuestos pueden desasociarse en amoníaco y ácido sulfúrico en la corriente de gas, y pueden proporcionar los efectos acondicionadores tanto del amoníaco como del ácido sulfúrico (proveniente del SO_3). Los compuestos de amonio pueden ser introducidos corriente arriba o corriente abajo del pre calentador de aire.^{11,23}

Los compuestos de amonio pueden mejorar el rendimiento de los PES disminuyendo la resistividad de las partículas, aumentando la carga espacial, y/o aumentando la cohesión de las partículas. La resistividad de las partículas puede ser reducida por el sulfato de amonio y el bisulfato de amonio. Ambos compuestos se comportan como el ácido sulfúrico, formando una capa de solución conductiva sobre la superficie de la ceniza flotante recolectada.

El ácido sulfúrico y el amoníaco formados cuando se descomponen los compuestos de amonio pueden reaccionar para formar partículas finas de sal que aumentan la carga espacial. Estas partículas aumentan la resistividad del gas, que a su vez aumenta la caída de voltaje entre los electrodos y permite la operación de los PES a voltajes aplicados más altos. La cohesión de las partículas también aumenta, lo que aumenta la eficiencia de recolección, a través de la condensación del ácido sulfúrico y a través de la adsorción de compuestos que forman una capa viscosa y pegajosa sobre las partículas.^{11,23}

El sulfato de amonio, el bisulfato de amonio y el ácido sulfúrico son efectivos en la reducción de la resistividad de la ceniza porque pueden formar una capa de solución conductiva sobre las partículas o descomponerse en SO_3 . Los compuestos de amonio pueden reducir la resistividad por un factor de aproximadamente 5. Mientras que los compuestos de amonio son efectivos la reducción de la resistividad, no son tan efectivos como el SO_3 . Se han reportado problemas de obstrucción en el pre calentador de aire cuando los agentes son inyectados previo al pre calentador.^{11,23}

El *Apollo LPA-445*, un agente acondicionador patentado que contiene compuestos de amonio, aumenta efectivamente la adhesividad de las cenizas. El *Apollo LPA-445* también ha demostrado que aumenta el número de partículas finas cuando es usado como un agente acondicionador. La carga espacial aumenta con un aumento en las partículas finas.^{11,23}

5.1.6.4 Acondicionamiento con Aminas Orgánicas

La investigación sobre las aminas orgánicas como agentes acondicionadores ha sido conducida en laboratorios y PES a escala piloto. De todas las aminas, la tri etilamina [$\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$] ha sido estudiada más extensivamente. La tri etilamina es un compuesto orgánico de nitrógeno que se comporta de manera similar al amoníaco, pero es una base más fuerte que el amoníaco. El mecanismo de acondicionamiento para la tri etilamina no es entendido completamente, pero parece ser que también reduce la resistividad de la ceniza flotante formando una capa conductiva sobre la superficie de la ceniza flotante.^{11,23}

Se ha demostrado que una dosis de 60 partes por millón (ppm) de tri etilamina reduce la resistividad de la ceniza desde 3×10^9 ohm - m hasta 5×10^7 ohm - m en una caldera a escala piloto. Un estudio de laboratorio ha demostrado reducciones, en la resistividad de 1 a 2, en los órdenes de magnitud, para una dosis de 25 ppm a temperaturas de 102°C a 150°C . La tri etilamina es más efectiva con temperaturas más bajas, cenizas menos básicas y dosis más altas del agente.^{11,23}

5.1.6.5 Acondicionamiento con Alcalies

Muchos carbones del occidente de los Estados Unidos producen una ceniza flotante con alta resistividad al ser quemados. Se ha determinado que la ceniza flotante tiene un contenido bajo de alcalies. Se ha descubierto que la resistividad de la ceniza flotante es inversamente proporcional a la concentración de litio y sodio en la ceniza. Por tanto, el acondicionamiento con alcalies se usa para reducir la resistividad aumentando la concentración de alcalies en la ceniza. Los compuestos de sodio son los usados más ampliamente como agentes acondicionadores. El sulfato de sodio y el carbonato de sodio se usan comúnmente. Se ha demostrado que el cloruro de sodio es efectivo en pruebas de laboratorio, pero no es utilizado industrialmente debido a su potencial de corrosión.^{11,23}

Los compuestos de sodio pueden reducir la resistividad de dos formas. El compuesto puede ser inyectado previo al PES y recolectado con la ceniza flotante. En este caso, el compuesto de sodio se mezcla con la ceniza y sirve como un medio conductivo. También reduce la resistividad de la capa de

polvo que se deposita sobre las placas. La segunda manera de reducir la resistividad de la ceniza flotante es única al acondicionamiento por medio de alcalíes. Los compuestos de sodio pueden ser inyectados dentro de la caldera y quemados con el carbón. En este método, el sodio se adhiere a la ceniza flotante y reduce la resistividad de la misma manera en que la presencia de sodio natural lo haría. ^{11,23}

Los compuestos de sodio son efectivos para reducir la resistividad de las cenizas flotantes si el sodio y la ceniza están bien mezclados. Se ha demostrado que una concentración de 1.0 a 1.5 por ciento de carbonato de sodio reduce la resistividad desde 2.1×10^{10} hasta 3.7×10^9 en un PES a escala piloto. Se han reportado reducciones de dos órdenes de magnitud en la resistividad de la ceniza como resultado de pruebas de campo. Pueden ocurrir problemas con fallas en la caldera cuando los compuestos de sodio son introducidos al carbón antes de la combustión. ^{11,23}

5.1.7 Costos del Acondicionamiento del Gas del Tubo de Escape

Los costos del acondicionamiento del gas del tubo de escape varían con el tamaño de la planta generadora de energía y el tipo de acondicionamiento instalado. También existen varios factores específicos de sitio que influenciarán los costos de acondicionamiento del gas, tales como el contenido de azufre del combustible, la resistividad de la ceniza flotante y la eficiencia de recolección inicial del PES previo al acondicionamiento del gas del tubo de escape. La tabla 5.1-4 proporciona estimaciones del capital y los costos anuales para el acondicionamiento del gas del tubo de escape en plantas generadoras de electricidad de servicio público. ^{23,24} Los datos de costo en la tabla 5.1-4 fueron escalados a febrero de 1996 cuando fue posible a través del uso del "Índice de Costos de Planta" de la revista *Chemical Engineering*. ²⁵ No se encontró ningún dato disponible para los compuestos de amonio y las aminas orgánicas; ésto probablemente sea debido a la experiencia industrial limitada con estos agentes acondicionadores. ^{11,23}

5.1.8 Energía y Otros Efectos Ambientales Secundarios del Acondicionamiento del Gas del Tubo de Escape

El acondicionamiento de gas del tubo de escape puede conducir a emisiones al aire de los compuestos formados por los agentes acondicionadores. ^{11,23} Sin embargo, no se asocia ningún impacto en energía con el acondicionamiento de gas del tubo de escape.

El acondicionamiento con trióxido de azufre puede conducir a emisiones de neblinas de ácido sulfúrico y compuestos de sulfato particulados causados por la condensación de ácido y la formación de sulfato sobre las partículas de ceniza flotante. El rendimiento del PES, la composición de la ceniza y la temperatura del gas tienen un efecto sobre las velocidades de emisión de estos compuestos. ^{11,23}

El acondicionamiento con sulfato de amonio puede resultar en un incremento en las emisiones de sulfatos. La mayoría de las emisiones de partículas de sulfato son menores de 1 micra. Los fosfatos de amonio pueden decomponerse para formar amoníaco y ya sea pentóxido de fósforo o fosfatos condensados. ^{11,23}

Aun cuando el acondicionamiento con amoníaco en la presencia de SO_3 forma un aerosol de bisulfato de amonio, el bisulfato de amonio debe ser recolectado por el PES. Un beneficio secundario del acondicionamiento con amoníaco es que las cantidades grandes de amoníaco reaccionarán con los óxidos de nitrógeno para formar nitrógeno elemental. ^{11,23}

Tabla 5.1-4. Costos de Acondicionamiento del Gas del Tubo de Escape

Agente Acondicionador	Costo Capital (\$Dls/kW) ^{a,c}	Annual Cost (mill. de \$Dls./kWh) ^{a,b}	Comentarios
Trióxido de Azufre	6.24	0.191	Los costos de capital fueron desarrollados a partir de los datos de 1982 (referencia 23). Los costos anuales están basados en los costos actuales para el azufre (\$300/Mg) de la referencia 25.
Amoniaco	0.25	0.024 ^c	Los costos de capital provienen de la referencia 23. Los costos anuales están basados en los costos de 1996 para el amoniaco (\$325/Mg) de la referencia 25, y los costos para el vapor (\$17.22/Mg) escalados a partir de los datos de 1982 de la referencia 23.
Alcalfés	2.47 - 4.78	0.03	Los costos de capital provienen de la referencia 23. Los costos anuales están basados en datos de 1979 de la referencia 23; la información disponible no es lo suficientemente detallada para permitir una escalación a los precios actuales.

^a Kilowatts de capacidad de una planta generadora de energía.

^b 1 mill. = \$0.001.

^c Escalados a febrero de 1996 usndo el Índice de Costos de Planta *Chemical Engineering* (referencia 26).

5.1.9 Referencias para la Sección 5.1

1. Cooper, C.D. and F.C. Alley. *Air Pollution Control: A Design Approach*. Second edition. Waveland Press, Prospect Heights, Illinois. 1994.
2. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a; NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
3. Theodore, L. and A.J. Buonicore. *Air Pollution Control Equipment, Volume I: Particulates*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 1988.
4. Perry, R.H. and D.W. Green. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Sixth edition. McGraw-Hill Publishing Company, New York, New York. 1984.
5. Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42). Volume I (5th Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.
6. *Air Pollution Engineering Manual*. A.J. Buonicore, and W.T. Davis, Eds. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania; and Van Nostrand Reinhold, New York, New York. 1992.
7. Stairmand, C.J. "The Design and Performance of Cyclone Separators." *Trans. Ind. Chem. Eng.* 29. 1951.
8. Swift, P. "Dust Control in Industry." *Steam Heating Engineering*. 38. 1969.
9. Lapple, C.E. "Processes Use Many Collector Types." *Chem. Eng.* 58:144-151. 1951.
10. Leith, D. and D. Mehta. *Atmospheric Environment*. 7:527. 1973.
11. *The Electrostatic Precipitator Manual (Revised)*. The McIlvaine Company. Northbrook, Illinois. January 1992.
12. Lapple, L.E. *Industrial Hygiene Quarterly*. 11:40. 1950.
13. Leith, D. and W. Licht. *AIChE Symposium Series*. 68:196. 1972.
14. Iozia, D.L. and D. Leith. "Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern." *Aerosol Science and Technology*. 10(3):491-500. 1989.
15. Iozia, D.L. and D. Leith. "The Logistic Equation and Cyclone Fractional Efficiency." *Aerosol Science and Technology*. 13(1). 1990.

16. Friedlander, S.K, L. Silverman, P. Drinker, and M.W. First. *Handbook on Air Cleaning*. USAEC (AECD-3361, NYO-1572), Washington, DC. 1952.
17. Iozia, D.L. and D. Leith. "Optimizing Cyclone Design and Performance." *Filtration and Separation*. 24(4):272-274. 1989.
18. Leith, D. and D.L. Jones. Chapter 15: "Cyclones," in Handbook of Powder Science and Technology, M.E. Fayed and L. Otten, Eds. Chapman and Hall, New York, New York. 1997.
19. Vataavuk, W.M. *Estimating Costs of Air Pollution Control*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan. 1990.
20. Vataavuk, W.M. "CO\$T-AIR" Control Cost Spreadsheets. Innovative Strategies and Economics Group, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.
21. Vataavuk, W.M. "Escalate Equipment Costs." *Chemical Engineering*. December 1995.
22. OAQPS Control Cost Manual (Fourth Edition, EPA 450/3-90-006) U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January 1990.
23. Flue Gas Conditioning (EPA-600/7-85-005, NTIS PB85-173912). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1985.
24. Oglesby, S., Jr. Future Directions of Particle Control Technology: A Perspective. *J. Air Waste Management Assoc.* 40(8)1184-1185. August 1990.
25. "Chemical Prices." *Chemical Marketing Reporter*. 250:7. August 12, 1996.
26. "Plant Cost Index." *Chemical Engineering*. July 1996.

5.2 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

Esta sección discute los principios básicos de operación, diseños típicos, aplicaciones industriales, y costos de los precipitadores electrostáticos (PES). La recolección de partículas mediante la precipitación electrostática involucra la ionización de la corriente pasando a través del PES, cargando, la migración, y la recolección de partículas sobre superficies cargadas opuestamente, y la remoción de partículas de las superficies recolectoras. En los PES en seco el particulado es removido por *rappers* (martillo o golpeo) los cuales vibran la superficie de recolección. Los PES en húmedo usan agua para lavar las partículas de las placas.

Los precipitadores electrostáticos tienen varias desventajas al compararlos con otros dispositivos de control. Son recolectores muy eficientes, aún para las partículas pequeñas. Debido a que las fuerzas de recolección actúan sólo sobre las partículas, los PES pueden tratar grandes volúmenes de gases con bajas caídas de presión. Pueden recolectar materiales secos, humos y neblinas. Los precipitadores electrostáticos también pueden operar sobre un amplio rango de temperaturas y generalmente poseen bajos costos de operación. Las posibles desventajas de los PES incluyen los altos costos de capital, los requisitos de espacios grandes, la inflexibilidad respecto a las condiciones operando, y la dificultad en controlar las partículas con alta resistividad.¹ Las desventajas de los PES pueden ser controladas con un diseño apropiado.

5.2.1 Recolección de Partículas

La recolección de partículas durante la precipitación electrostática es el resultado final de varios pasos. Estos pasos incluyen el establecimiento de un campo eléctrico, generación de la corona, ionización de la corriente de gas, , cargando partículas, y la migración hacia el electrodo recolector. Un arreglo típico de PES se muestra en la figura 5.2-1.² En esta ilustración, el electrodo de descarga es un alambre con pesas y el electrodo recolector es un tubo. Un PES de alambre - tubo contendría muchos de esos alambres - tubos.

5.2.1.1 Campo Eléctrico

El campo eléctrico juega un papel importante en el proceso de precipitación en que provea la base para la generación de la corona requerida para cargar y las condiciones necesarias para establecer una fuerza para separar el particulado de las corrientes de gas.² Se forma un campo eléctrico con la aplicación de alto voltaje a los electrodos de descarga del PES; la fuerza de este campo eléctrico es un factor crítico en el rendimiento de los PES.³

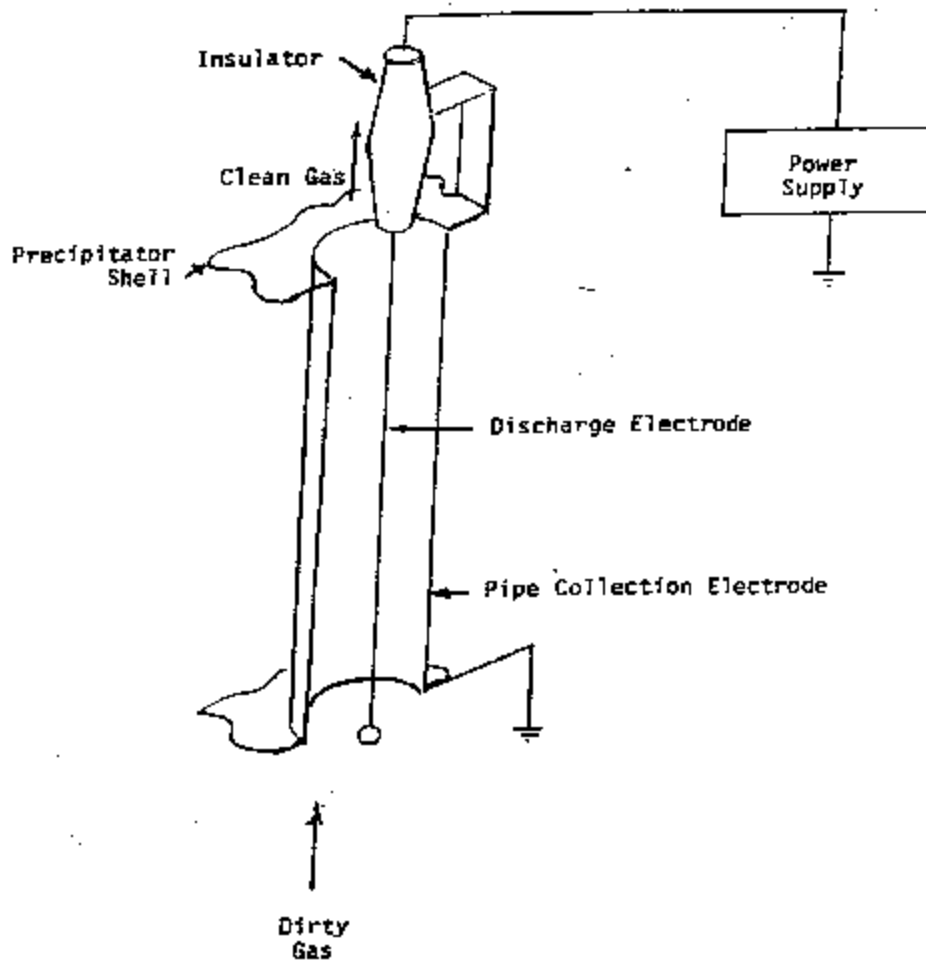


Figure 5.2-1. Cutaway view of Wire-Pipe Electrostatic Precipitator (Reference 2).

Traducción de términos de la figura 5-2.1

Insulator = insulador

Clean gas = gas limpio

Dirty gas = gas contaminado

Precipitator shell = coraza del precipitador

Power supply = fuente de energía

Discharge electrode = electrodo de descarga

Pipe collection electrode = electrodo recolector del tubo

Figura 5.2-1. Perspectiva de un Corte Longitudinal de un Precipitador Electrostático de Alambre-Tubo (Referencia 2).

El campo eléctrico se desarrolla en el espacio inter-electródico de un PES y sirve un propósito triple. Primero, el alto campo eléctrico alrededor del electrodo de descarga causa la generación de iones cargantes en una corona eléctrica; segundo, el campo proporciona la fuerza motriz que impulsa a estos electrones a chocar con las partículas e impartirles su carga; y tercero, proporciona la fuerza que impulsa el particulado cargado hacia el electrodo recolector para su remoción de la corriente de gas efluente.²

El campo eléctrico en un PES es el resultado de tres factores contribuyendo: el componente electrostático resultando de la aplicación de un voltaje en un sistema de electrodos dual, el componente que resulta de la carga espacial de los iones y electrones libres, y el componente resultando del particulado cargado. Cada uno de estos factores puede asumir un papel dominante en la determinación del campo en una serie determinada de circunstancias. Por ejemplo, el campo eléctrico en los primeros pies de la sección de entrada de un PES que recolecta particulado proveniente de una corriente de gas altamente cargada de particulados puede ser dominado por la carga espacial de las partículas; mientras el campo en la sección de salida de un PES altamente eficiente es por lo general dominado por la carga espacial iónica.²

La fuerza o magnitud del campo eléctrico es una indicación de la efectividad de un PES.³ Dos factores son críticos para la magnitud alcanzable del campo eléctrico en un PES. Primeramente, la alineación mecánica de la unidad es importante. Si ocurre un des-alineamiento en una región localizada que resulta en una aproximación cercana de la corona y los electrodos recolectores, el voltaje de chispa para esa sección eléctrica completa será limitada. El segundo es la resistividad del particulado recolectado, la cual puede limitar la densidad de la corriente operante y el voltaje aplicado que resulta en un campo eléctrico reducido.²

5.2.1.2 Generación de Corona

La corona es la región eléctricamente activa de la corriente de gas, formada por el campo eléctrico, donde los electrones son desprendidos de las moléculas neutras del gas dejando iones positivos. Los iones positivos son impulsados en una dirección y los electrones libres en otra. Las condiciones necesarias para la formación de la corona incluyen la presencia de un campo eléctrico con una magnitud suficiente para acelerar un electrón libre a una energía requerida para ionizar a una molécula neutra de gas al impacto, y a una fuente de electrones a actuar como electrones iniciadores para el proceso.²

Los detalles de la generación de un campo eléctrico fueron discutidos arriba. En términos de las fuentes de electrones, siempre existe una fuente de electrones libres disponible de la ionización de las moléculas de gas ya sea por rayos cósmicos, radioactividad natural, fotoionización, o la energía térmica del gas.² La corona es generada por un mecanismo al que comúnmente se le refiere como avalancha de electrones. Este mecanismo ocurre cuando la magnitud del campo eléctrico aplicado es suficientemente grande para acelerar los electrones libres. Cuando los electrones libres alcanzan una velocidad suficiente, ellos chocan con las moléculas neutras de gas y las ionizan. La ionización ocurre cuando la fuerza de colisión remueve un electrón de la molécula de gas, resultando en una molécula de gas cargada positivamente y otro electrón libre. Estos electrones recién liberados también son acelerados y causan ionización adicional.²

La corona puede ser ya sea positiva o negativa; pero la corona negativa es utilizada en la mayoría de los PES industriales puesto que posee características inherentemente superiores que aumentan la eficiencia de recolección bajo la mayoría de las condiciones de operación.³

5.2.1.3 Cargando Partícula

Cargando partícula en un PES (y la recolección sub-secuente) tiene lugar en la región entre el límite del resplandor de la corona y el electrodo recolector, donde las partículas de gas están sujetas a la generación de iones negativos provenientes del proceso de corona (negativo).³

Al entrar en el PES, las partículas descargadas de polvo suspendidas en la corriente de gas efluente están expuestas a una región de espacio llena de iones y, en el caso de una corona negativa, quizás algunos electrones libres. A medida que estas cargas eléctricas se aproximan a las partículas de polvo eléctricamente neutras, un dipolo inducido se establece en la materia del particulado mediante la separación de la carga dentro de las partículas.² Como un dipolo, la partícula en sí permanece neutral mientras que las cargas positivas y negativas dentro de la partículas se concentran dentro de áreas separadas. Las cargas positivas dentro de la partícula se atraen hacia el área de la partícula más cercana al ion negativo que se aproxima. A medida que un ion negativo hace contacto con la materia particulada, las cargas positivas inducidas retendrán alguna carga eléctrica del ion. Esto resulta en una carga negativa neta sobre el particulado previamente neutral. Es requerida la presencia de una carga eléctrica para que el campo eléctrico ejerza una fuerza sobre la partícula y remueva el particulado de la corriente de gas.²

El Cargar, es generalmente hecho por ambos mecanismos; los de campo, y de la difusión. El mecanismo dominante varía con el tamaño de la partícula. En cargar por campo, los iones provenientes de la corona son impulsados hacia las partículas por un campo eléctrico. A medida que los iones continúan a repercutir sobre las partículas de polvo, la carga sobre ellas aumenta hasta que el campo local desarrollado por la carga sobre la partícula causa una distorsión de las líneas del campo eléctrico para que ya no intercepten a la partícula y no se efectúe ninguna carga nueva. Este es el mecanismo dominante para las partículas mayores de alrededor de 0.5 micras.³

El Cargar por difusión es asociado con la fijación de iones que resultan del movimiento termal al azar; éste es el mecanismo dominante de cargar partículas menores de alrededor de 0.2 micras. Tal como en el caso de cargar por campo, el cargar por difusión está influenciado por la magnitud del campo eléctrico, ya que el movimiento de los iones se gobierna por las fuerzas tanto eléctricas como difusionales. Ignorando a las fuerzas eléctricas, el cargar por difusión resulta cuando el movimiento termal de las moléculas causa que ellas se difundan a través del gas y hagan contacto con las partículas. La razón de cargar disminuye a medida que la partícula adquiere carga y repele iones adicionales de gas, pero la acción de cargar continúa hasta cierto punto.³

El rango del tamaño de las partículas de aproximadamente 0.2 a 0.5 micras es una región transicional en la cual ambos mecanismos de cargado están presentes pero ninguno domina. Los datos de pruebas de eficiencia fraccional han demostrado una eficiencia de recolección reducida en este rango transicional de tamaño, en donde los cargados por difusión y por campo se sobreponen.³

5.2.1.4 Recolección de Partículas

El paso final en la recolección de las partículas en un PES incluye el movimiento de las partículas cargadas hacia un electrodo con carga opuesta que sostiene a las partículas en su lugar hasta que el electrodo es limpiado. Típicamente, los electrodos recolectores son placas planas paralelas o tubos que son cilíndricos, cuadrados o hexagonales.²

El movimiento de las partículas hacia el electrodo recolector es impulsado por un campo eléctrico. El movimiento de las partículas más grandes (mayores de 10 to 20 micras) seguirán más o menos una trayectoria determinada por la velocidad promedio del gas y la velocidad eléctrica promedio de las

partículas.² La trayectoria para las partículas más pequeñas (<10 micras) será menos directa, puesto que los efectos inerciales del flujo turbulento del gas predominan por encima de la velocidad eléctrica inducida por la carga eléctrica relativamente menor. El movimiento en general de las partículas más pequeñas, sin embargo, será hacia el electrodo recolector. La eficiencia de recolección acumulativa de un PES depende generalmente de la eficiencia de recolección fraccional de estas partículas más pequeñas, especialmente de las de 0.2 a 2.0 micras de tamaño.²

5.2.2 Mecanismos de Penetración

Existen varias condiciones que pueden reducir la efectividad de los PES y conducir a la penetración del particulado. Estas condiciones incluyen la corona inversa, el reencauzamiento del polvo, la erosión, la transición, y el escape de gas.

5.2.2.1 Corona Inversa

La corona o ionización inversa describen las condiciones bajo las cuales ocurre una falla eléctrica en un PES. Normalmente en un PES se forma una corona en el electrodo de descarga, creando electrones e iones negativos que son impulsados hacia el electrodo de recolección (positivo) por el campo eléctrico. Esta situación se reversa si la corona se forma en el electrodo de recolección (positivo). Una corona en este electrodo genera iones positivos que son proyectados hacia el espacio interelectrónico e impulsados hacia el electrodo de descarga.²

A medida que los iones positivos fluyen hacia el espacio interelectrónico en un PES, se encuentran con particulados cargados negativamente e iones negativos. El campo eléctrico proveniente del particulado cargado excede el de un ion a la mayoría de las distancias. Por lo tanto, la mayoría de los iones positivos fluyen hacia las partículas de polvo cargadas negativamente, neutralizando su carga. Esta neutralización de la carga causa una reducción proporcional en la fuerza eléctrica que actúa para recolectar estas partículas.²

Un segundo mecanismo mediante el cual la corona inversa pudiera ser disruptiva para la recolección por medio de PES está basado en la neutralización de una porción de la carga espacial que contribuye al campo eléctrico adyacente al electrodo recolector. El componente de la carga espacial del campo eléctrico cerca de la zona de recolección puede ser tan grande como el 50 por ciento del campo total. La neutralización de la carga espacial reduce la fuerza total de recolección por una fracción igual.²

5.2.2.2 Re-encauzamiento del Polvo

El reencauzamiento del polvo asociado con la recolección por PES en seco puede ocurrir después de que la capa de polvo es completamente desalojada de las placas por medio de golpecitos. La primera oportunidad para el reencauzamiento por martilleo ocurre cuando la capa de polvo empieza a caerse y romperse al caer. Las partículas de polvo son barridas de vuelta hacia la corriente circulante de gas. La segunda oportunidad ocurre a medida que el polvo cae dentro de la tolva, impacta el polvo recolectado y se esponja para formar una nube de polvo. La corriente circulante de gas recoge porciones de esta nube de polvo. Algo del polvo pudiera ser recolectado.²

La erosión directa del polvo recolectado proveniente del electrodo recolector puede ocurrir cuando las velocidades del gas superan los 10 pies por segundo (pps). La mayoría de los PES poseen velocidades de gas menores de 8 pps, mientras que las instalaciones más nuevas poseen velocidades menores de 4 pps. Se propone la teoría de que la salación es una forma menor de re-encarrilamiento que ocurre a medida que las partículas son recolectadas. y golpea el electrodo recolector, pudiera soltar otras partículas que están re-suspendidas en la corriente de gas. Otras causas de reencauzamiento en un PES

son la producción de chispas eléctricas, la fuga de aire a través de la tolva y el reencauzamiento eléctrico asociado con la baja resistividad de las partículas.²

5.2.2.3 Escabullimiento del Polvo

La construcción de un PES es tal que existen regiones no electrificadas en la parte superior del PES donde se localizan la distribución eléctrica, el soporte de las placas y los sistemas de martilleo. De manera similar, ciertas porciones de la tolva recolectora y el fondo del sistema de electrodos contienen regiones no electrificadas. Las corrientes cargadas de partículas que fluyen a través de estas regiones no estarán sujetas a las fuerzas de recolección y tienden a pasar a través del PES sin ser recolectadas. La cantidad de escabullimiento de gas y desviación a través de las regiones no electrificadas establecerán un límite superior sobre la eficiencia de recolección de un PES.²

5.2.3 Tipos de Precipitadores Electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos se dividen generalmente en dos grupos amplios, los PES en seco y los PES en húmedo. La distinción se basa en cuál método se usa para remover al particulado de los electrodos recolectores. En ambos casos, la recolección de partículas ocurre de la misma manera. Además de las opciones en seco y en húmedo, hay variaciones internas de PES a disposición. Los dos diseños más comunes son los recolectores de placa-alambre y tubo-alambre. Los precipitadores electrostáticos son diseñados con frecuencia con varios compartimientos para facilitar su limpieza y mantenimiento.

5.2.3.1 PES en Seco

PES en Seco remueve el polvo de los electrodos recolectores al hacer vibrar a los electrodos mediante el uso de golpeadores. Los tipos comunes de golpeadores son los martillos de impacto por gravedad y los vibradores eléctricos. Para un PES determinado, la intensidad y la frecuencia del golpeo debe ser ajustada para optimizar el rendimiento. La energía sónica también es utilizada para ayudar en la remoción del polvo en algunos PES en Seco. Los componentes principales de los PES en Seco pueden ser diseñados para operar en muchas condiciones diferentes de la corriente, temperaturas y presiones. Sin embargo, una vez que un PES es diseñado e instalado, lo más probable es que los cambios en las condiciones de operación degraden el rendimiento.^{1,2,3}

5.2.3.2 PES en Humedo

Los componentes básicos de un PES en Humedo son los mismos que los de un PES en Seco excepto que un PES en Humedo requiere un sistema de aspersión de agua en vez de un sistema de golpeadores. Debido a que el polvo es removido de un PES en Humedo en forma de sedimento lodoso, las tolvas se reemplazan típicamente con un sistema de drenaje. Los PES en Humedo tienen varias ventajas sobre los PES en Seco. Pueden absorber gases, causar que algunos contaminantes se condensen, son fácilmente integrados con absorbedores, y eliminan el reencauzamiento de las partículas capturadas. Los PES en Humedo no están limitados por la resistividad de las partículas ya que la humedad en un PES en Humedo disminuye la resistividad de las partículas que normalmente tienen una alta resistividad.^{2,4}

Previamente, el uso de los PES en Seco eran restringidos a unas pocas aplicaciones especializadas. A medida que las eficiencias más altas se han vuelto más deseables, las aplicaciones de los PES en Seco han ido aumentando. Los PES en seco están limitados a operar a la temperatura de la corriente por debajo de aproximadamente 170°F (77°C.) En un PES en húmedo, el particulado recolectado es removido de los electrodos recolectores mediante un lavado de agua o de algún otro líquido apropiado. Algunas aplicaciones de los PES requieren una aspersión continua del líquido dentro de la corriente de

gas; en otros casos, la aspersion debe ser intermitente. Puesto que la aspersion del liquido satura la corriente de gas en un PES en humedo, tambien proporciona enfriamiento y acondicionamiento del gas. Las gotitas liquidas en la corriente de gas son recolectadas junto con particulas y proporcionan otra manera de enjuagar los electrodos recolectores. Algunos disenos de PES establecen una pelicula delgada de liquido que enjuaga los electrodos recolectores.^{2,3}

5.2.3.3 PES de Placa-Alambre

Los PES de placa-alambre son hasta el momento el diseno mas comun de un PES. En un PES de placa-alambre, una serie de alambres se encuentran suspendidos de un marco en la parte superior de la unidad. Los alambres generalmente tienen pesas en el fondo para mantenerlos derechos. En algunos disenos, tambien esta provisto un marco al fondo de los alambres para mantener sus distancias entre si. Los alambres, acomodados en filas, actuan como electrodos de descarga y estan centrados entre placas paralelas grandes, las cuales actuan como electrodos recolectores. Las superficies de flujo entre las placas de PES de alambre-tubo se llaman conductos. Las alturas de los conductos son tipicamente de 20 a 45 pies.² Un PES de alambre-tubo tipico se muestra en la figura 5.2-2.²

Los PES de placa-alambre pueden ser disenados para lavado en seco o en humedo. La mayoria de los PES grandes de placa-alambre, los cuales son contruidos en el sitio, son en seco. Los PES de placa-alambre son mas comunes entre las unidades pequenas que son pre-ensambladas y empacadas para entrega al sitio.⁴ En un PES de placa-alambre en humedo, el sistema de lavado se localiza encima de los electrodos.²

5.2.3.4 PES de Tubo-Alambre

En un PES de tubo-alambre, un alambre que funciona como el electrodo de descarga atraviesa a lo largo del eje de un tubo largo, el cual sirve como electrodo recolector. Los alambres con pesas estan suspendidos de un marco en la parte superior del PES. Los tubos pueden ser cilindricos, cuadrados o hexagonales. Un ejemplo de un diseno de tubo-alambre se presenta en la figura 5.2-3. Previamente, solo se utilizaban los tubos cilindricos; los tubos cuadrados y hexagonales han crecido en popularidad recientemente. El espacio entre los tubos cilindricos crea bastante superficie de recoleccion desperdiciada. Los tubos cuadrados y hexagonales pueden empacarse con mayor proximidad entre si, de manera que la pared interior de un tubo es la pared exterior de otro.⁴ Esta situacion se ilustra en la figura 5.2-4.

Los recolectores de tubo-alambre son muy efectivos para las velocidades bajas de flujo de gas y para recolectar neblinas (eliminador de neblinas). Pueden utilizar metodos de limpieza en seco o en humedo, pero la vasta mayoria son lavados por un enjuague liquido. Tal como con los recolectores de placa-alambre, el mecanismo de limpieza en un PES de tubo-alambre se localiza por encima de los electrodos. Estos tubos son por lo general de 6 a 12 pulgadas de diametro y de 6 a 15 pies de longitud.²

Figura 5.2-2. Precipitador Electrostático de Placa-Alambre (Referencia 2).

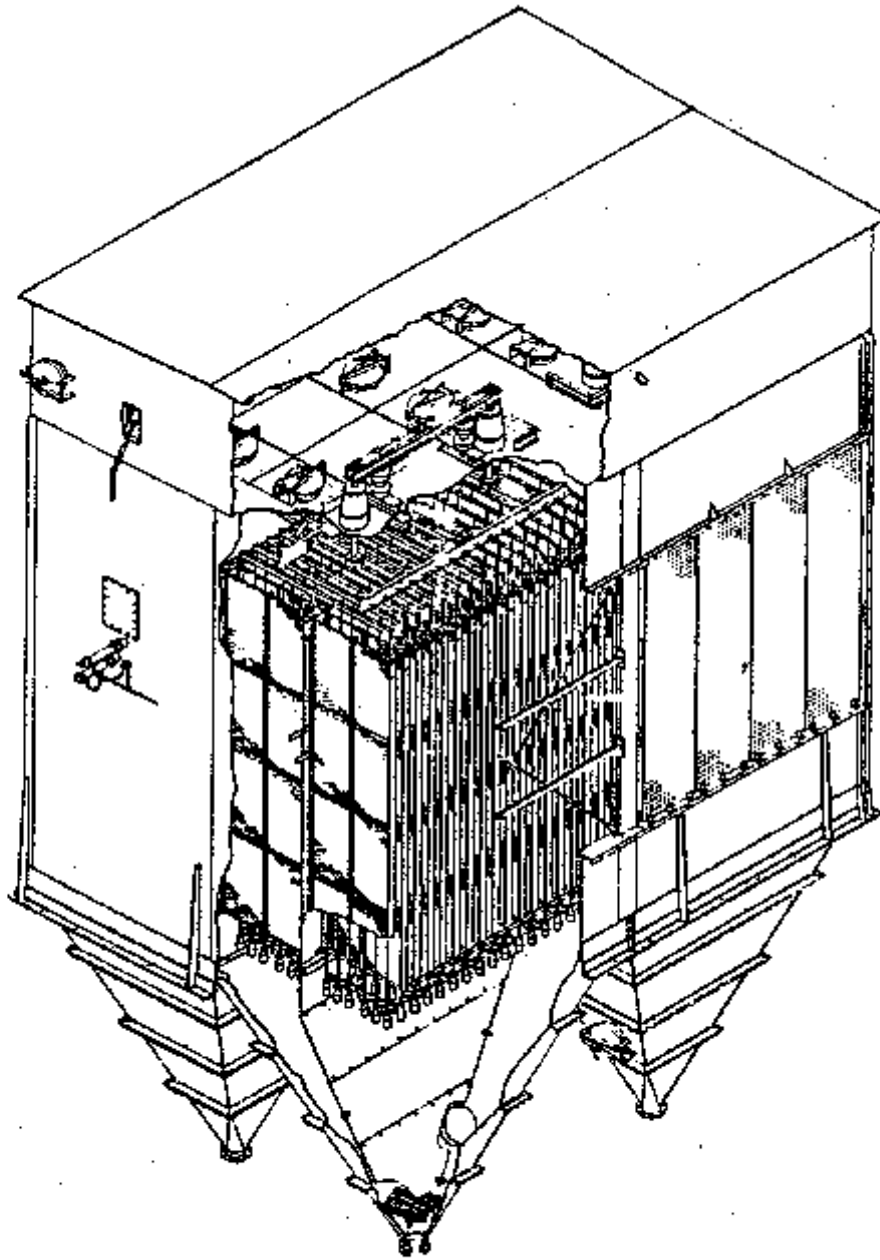


Figure 5.2-2. Wire-Plate Electrostatic Precipitator (Reference 2).

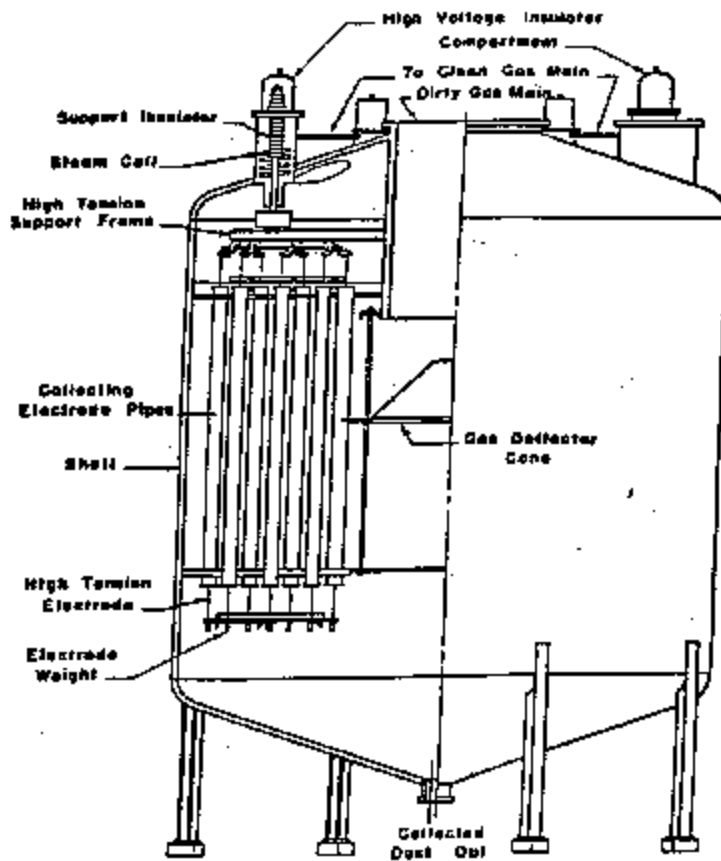


Figure 5.2-3. Wire-Pipe Electrostatic Precipitator (Reference 2).

Traducción de términos de la figura 5-2.3

High voltage insulator compartment = Compartimiento insulador de alto voltaje	Support insulator = Insulador de soporte
To clean gas main = Hacia la toma de gas limpio de gases	Steam cell = Celda de vapor
To dirty gas main = Hacia la toma de gas contaminado	Gas deflector cone = Cono deflector
High Tension Support Frame = Marco de soporte de alta tensión	Collecting electrode pipe = Tubo del electrodo recolector
High tension electrode = Electrodo de alta tensión electrodo	Shell = Coraza
Collected dust out = Polvo de salida recolectado	Electrode Weight = Pesa del

Figura 5.2-3. Precipitador Electrostático de Tubo-Alambre (Referencia 2).

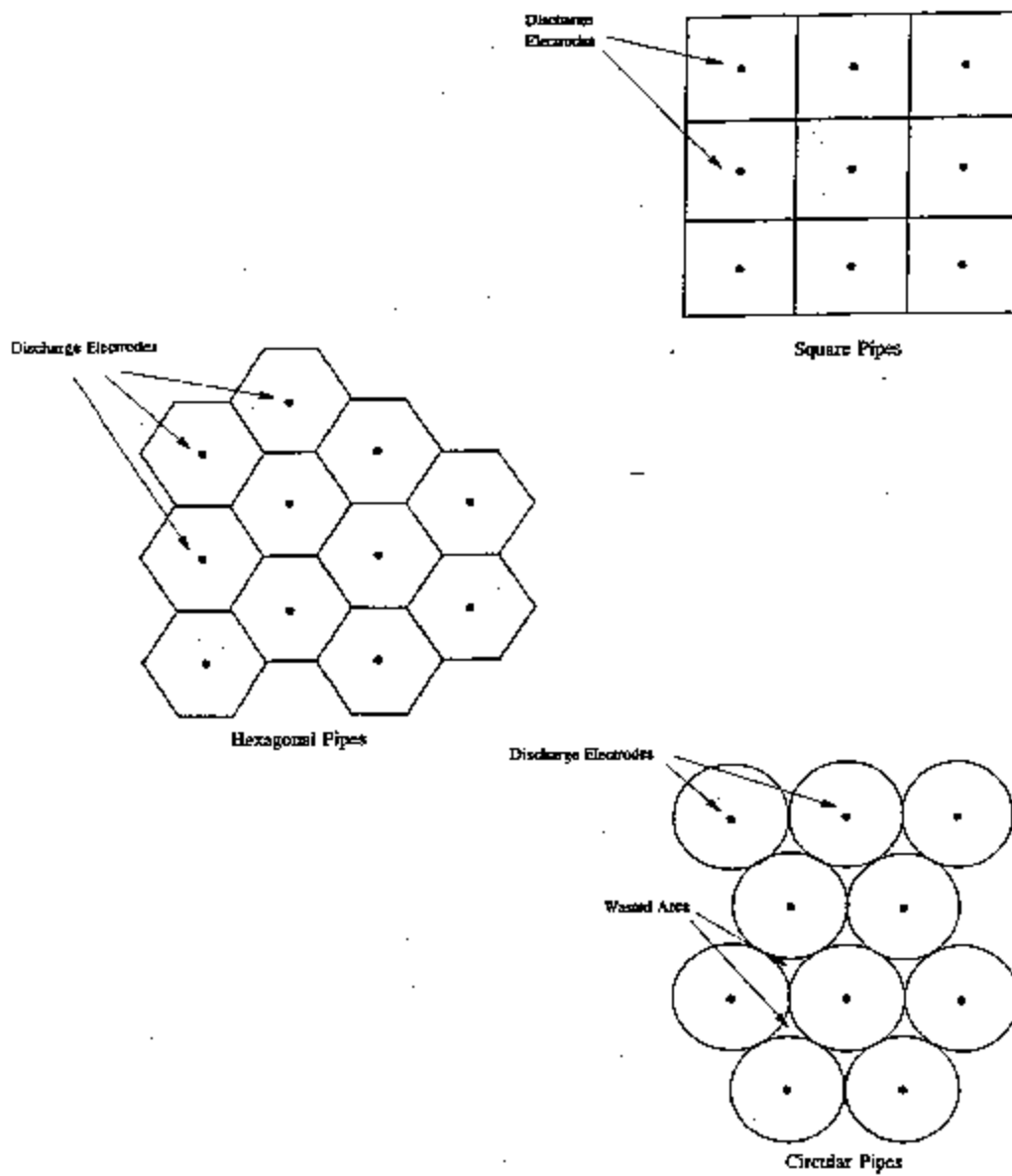


Figure 5.2-4. Square, Hexagonal, and Circular Pipe Arrangements for Wire-Pipe Precipitators (adapted from Reference 4).

Traducción de los títulos de la figura 5-2.4

Discharge electrodes = Electrodo de descarga

Wasted area = Superficie desperdiciada

Square pipes = Tubos cuadrados

Hexagonal pipes = Tubos hexagonales

Figura 5.2-4. Arreglos de Tubería Cuadrada, Hexagonal y Circular para Precipitadores de Tubo-Alambre (adaptado de la Referencia 4).

5.2.3.5 Otros Diseños de PES

Placa de Marco Rígido. Este diseño de PES es muy parecido al PES de placa-alambre, con la excepción de que el electrodo de descarga es un marco rígido, en vez de una serie de alambres con pesas, que es colocado entre las placas. El marco soporta a los electrodos de descarga de alambre. Este tipo de PES opera de la misma manera que el de placa-alambre y puede ser en seco o en húmedo. En general, el diseño rígido de marco es más durable que los alambres con pesas, pero tiene un costo inicial (capital) más alto.^{2,3} Los marcos rígidos se han vuelto el diseño preferido en algunas industrias, tales como la pulpa y el papel.⁵ La figura 5.2-5 proporciona un ejemplo de un PES de placa-marco rígido.

Distanciamiento Ancho Entre las Placas.⁶ Las superficies de flujo entre las placas de un PES de placa-alambre convencional generalmente varían entre 8 y 12 pulgadas de ancho. Una mejoría reciente en estas unidades ha sido un distanciamiento entre las placas de hasta 20 pulgadas de anchura. El distanciamiento amplio resulta en una mayor fuerza del campo recolector debido al aumento resultante en una carga espacial, una densidad de corriente más uniforme, y velocidades de migración más altas. Una mayor variación en la geometría del electrodo de descarga también es posible con el distanciamiento ancho entre las placas, reduciendo así el tamaño y el costo total del PES.⁷

Variaciones del Electrodo.^{1,2} Además de los marcos rígidos, existen varias otras variaciones de electrodos que no son tan comunes. En algunos casos, los electrodos de descarga completamente rígidos son preferidos por encima de los alambres con pesas o los marcos rígidos con alambres.¹ Otros diseños de electrodos de descarga son alambres cuadrados, alambres de púas, tiras aserradas de metal, y tiras de metal con agujas a intervalos regulares. Las púas, el aserrado y las agujas en los electrodos de descarga ayudan a establecer un campo eléctrico uniforme. En algunos casos, se usan placas planas como electrodos tanto de descarga como de recolección. Los electrodos recolectores son modificados con frecuencia con trabas para mejorar el flujo de gas y la recolección de partículas. Algunos PES utilizan una malla metálica en vez de placas planas como electrodos recolectores. Algunos ejemplos de electrodos de descarga y de placas de recolección se muestran en la figura 5.2-6.

Placa Concéntrica.³ En este diseño, el PES consiste en cilindros verticales que están acomodados concéntricamente y actúan como electrodos recolectores. Las paredes de los cilindros son enjuagadas continuamente por una película delgada de líquido la cual es suministrada por un sistema por encima de los electrodos. Los electrodos de descarga están hechos de malla alámbrica localizada entre los cilindros. Este tipo de PES es operado únicamente como un PES en húmedo. El PES de placas concéntricas se ilustra en la figura 5.2-7.

Energización Pulsada.² Algunos PES han obtenido éxito con la energización pulsada. Los PES convencionales dependen de una base constante de voltaje aplicada al electrodo de descarga para generar la corona y el campo eléctrico. En la energización por pulso, pulsos de alto voltaje de corta duración (de unos pocos microsegundos) son aplicados a los electrodos de descarga. Un sistema típico de energización de pulso operará con voltajes de pulso de una magnitud de 100 kilovoltios (kV) en vez de los 50 kV usados con la energización. Los pulsos producen una distribución más uniforme de la corriente sobre el electrodo recolector.⁸ Los pulsos pueden ser usados por sí solos o además de un voltaje de convencional. Los pulsos producen una distribución más uniforme de la corriente sobre el electrodo recolector.⁹ Los pulsos pueden ser usados por sí solos o además de un voltaje de base y se ha demostrado que aumentan la eficiencia de recolección de los PES con energización pobre. La energización por pulso ha sido utilizada con éxito en la industria eléctrica de servicio público. La compañía *Ion Physics Corp.* ha realizado

pruebas de este procedimiento en *Madison Gas and Electric*, en Madison, Wisconsin.¹⁰ Esta técnica está, sin embargo, aun esta evolucionando para permitir un enfoque más racional a la energetización por pulso y, quizás, para reducir el costo.⁶

PES de dos etapas.^{2,3} Todos los diseños de PES mencionados anteriormente han sido PES de una sola etapa. En un PES de una sola etapa, el cargado y la recolección de las partículas toma lugar simultaneamente en el mismo lugar físico. Los PES de dos etapas son diferentes en cuanto a que el cargado de las partículas se realiza en una sección separada que antecede a la recolección. Los PES de dos etapa son los más apropiados para cargamentos de polvo bajos y partículas finas. Se utilizan con frecuencia para limpiar el aire en edificios.

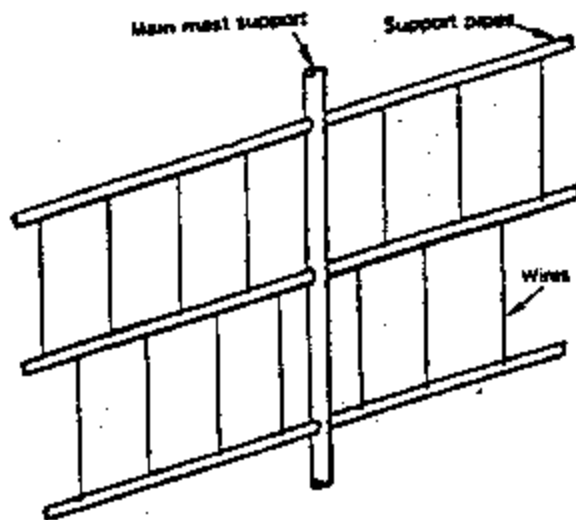


Figure 5.2-5. Rigid Frame Electrode (Reference 2).

Figura 5.2-5. Electrodo de Marco Rígido (Referencia 2).

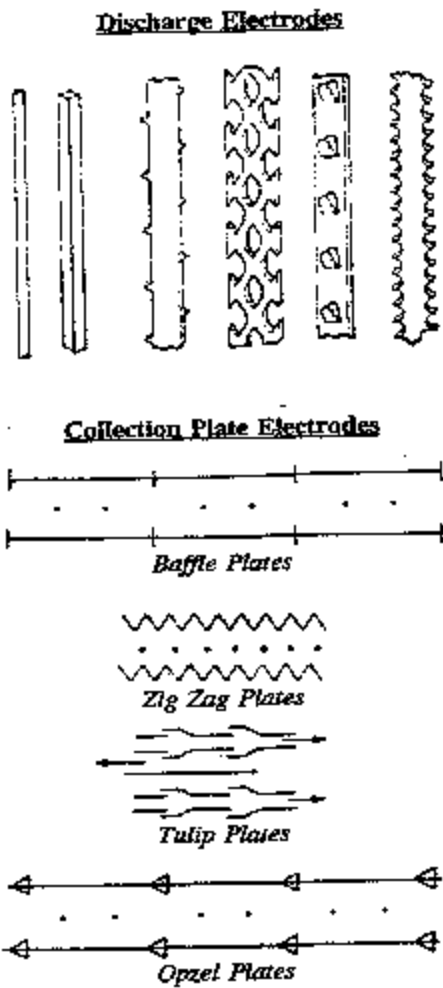


Figure 5.2-6. Various Discharge Electrodes and Collection Plate Designs (Reference 2).

Figura 5.2-6. Varios Diseños de Electrodo de Descarga y Placas de Recolección (Ref 2)
Traducción de Términos

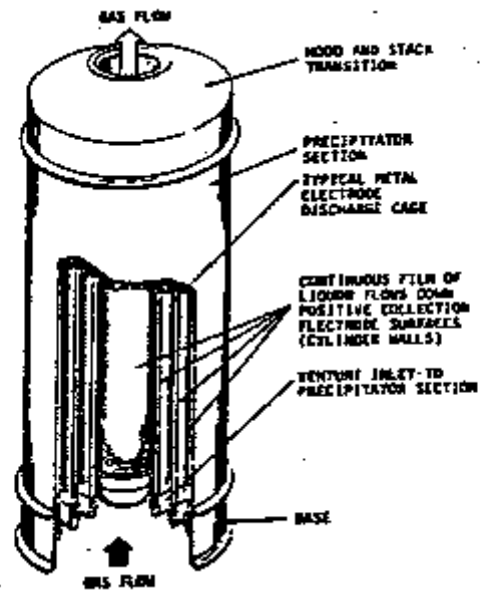


Figure 5.2-7. Concentric Plate Electrostatic Precipitator (Reference 3).

Discharge electrodes = Electrodo de descarga	Baffle plates = Placas de
Collection plate electrodes = Electrodo de placa de recolección	
Zig zag plates = Placas cheurón	Tulip plates = Placas de tulipán
Opzel plates = Placas de Opzel	

Traducción de Términos de la Figura 5.2-7.

Gas flow= Flujo del gas

Precipitator section = Sección del precipitador

Hood and stack transition = Transición entre la campana de extracción y la chimenea

Typical metal electrode discharge cage = Jaula típica de metal del electrodo de descarga

Continuous film of liquor flows down positive collection electrode surfaces

= Película continua de licor que fluye descendiendo por las superficies del electrodo recolector positivo.

Venturi inlet to precipitation section = Entrada tipo Venturi a la sección de precipitación

Figura 5.2-7. Precipitador Electrostático de Placas Concéntricas

5.2.4 Eficiencia de Recolección

Los precipitadores electrostáticos son capaces de recolectar más del 99 por ciento de todos los tamaños de particulado.¹ La eficiencia de recolección experimenta efectos por varios factores incluyendo la resistividad del gas, la temperatura del gas, la composición química (del polvo y del gas), y la distribución del tamaño de las partículas.

La resistividad de un polvo es la medida de su resistencia a la conducción eléctrica y tiene un gran efecto en el rendimiento de los PES en seco. La eficiencia de un PES está limitada por la fuerza del campo eléctrico que puede generar, la cual a su vez depende del voltaje aplicado a los electrodos de descarga. El voltaje máximo que puede ser aplicado se determina por el voltaje de chispa. A este voltaje, un camino entre los electrodos de descarga y de recolección es ionizado y se produce la chispa. Los polvos altamente resistivos aumentan la producción de chispas, lo cual fuerza al PES a operar a voltajes más bajos. La efectividad de un PES disminuye como resultado del voltaje de operación reducido.²

Los polvos de alta resistividad también mantienen su carga eléctrica por un período de tiempo relativamente largo. Esta característica vuelve difícil la remoción del polvo de los electrodos recolectores. Para desprender el polvo, la intensidad del golpeo debe ser aumentada. El golpeo de alta intensidad puede dañar el PES y causar un reencauzamiento severo, conduciendo a una eficiencia de recolección reducida. El polvo de baja resistividad también puede tener un impacto negativo sobre el rendimiento de los PES. El polvo de baja resistividad pierde su carga rápidamente una vez que es recolectado. Cuando los electrodos recolectores son limpiados, aún con un golpeo ligero, puede ocurrir un reencauzamiento serio.²

La temperatura y la composición química del polvo y de la corriente de gas son factores que pueden influenciar la resistividad del polvo. La corriente es conducida a través del polvo mediante dos maneras, la conducción por volumen y la conducción por superficie. La conducción por volumen se lleva a cabo a través del material mismo, y depende de la composición química del polvo. La conducción por superficie ocurre a través de gases o líquidos adsorbidos por las partículas, y depende de la composición química de la corriente de gas. La resistividad del volumen aumenta con el aumento de la temperatura y es la fuerza resistente dominante a temperaturas por encima de aproximadamente 350°F. La resistividad de la superficie disminuye con el aumento de la temperatura y predomina a temperaturas por debajo de alrededor de 250°F. Entre 250 y 350°F, la resistividad del volumen y de la superficie ejercen un efecto combinado, siendo la resistividad total la más alta en este intervalo de temperatura.^{2,3}

Para la ceniza de carbón, la resistividad de la superficie es muy influenciada por el contenido de azufre del carbón. Los carbones bajos en azufre tienen una resistividad alta, porque hay una adsorción reducida de los gases conductivos (tales como el SO₃) por la ceniza de carbón. La eficiencia de recolección para polvos de alta resistencia puede ser mejorada con el acondicionamiento químico del gas de escape que involucre la adición de pequeñas cantidades de sustancias químicas dentro de la corriente del gas (discutido en la sección 5.1, Pretratamiento). Las sustancias químicas típicas incluyen el bióxido de azufre (SO₂), el amoníaco (NH₃), y el carbonato de sodio. Estas sustancias químicas proporcionan gases conductivos que pueden reducir sustancialmente la resistividad de la superficie de la ceniza flotante.¹¹ La resistividad también puede ser reducida por medio de la inyección de vapor o agua dentro de la corriente de gas.²

En general, los PES en seco operan de la manera más eficiente con resistividades entre 5×10^3 y 2×10^{10} ohm-cm.² EL diseño y la operación de un precipitador electrostático es difícil para las resistividades de polvo por encima de 10^{11} ohm-cm.² La resistividad del polvo por lo general no es un factor para los PES en húmedo.¹² La distribución del tamaño de las partículas tiene un impacto sobre el rendimiento total de un PES. En general, las partículas más difíciles de recolectar son aquellas con

diámetros aerodinámicos entre 0.1 and 1.0 : m. Las partículas entre 0.2 and 0.4 : m generalmente muestran la mayor penetración. Esto es más probablemente un resultado de la región de transición entre el cargado de difusión y de campo. La figura proporciona curvas de eficiencia de recolección acumulativa para los PES que operan en las industrias de servicios públicos, cobre, y hierro y acero. Las curvas fueron derivadas de los factores de emisión.¹² La tabla 5.2-1 presenta las eficiencias de recolección acumulativas para la MP₁₀ y la MP_{2.5}.

5.2.5 Aplicabilidad

Aproximadamente el 80 por ciento de todos los PES en los Estados Unidos son utilizados en la industria eléctrica de servicio público. Muchos PES también son usados en las industrias de papel y pulpa (7 por ciento), cemento y otros minerales (3 por ciento), hierro y acero (3 por ciento), y metales no ferrosos (1 por ciento).¹ La tabla 5.2-2 enumera las aplicaciones comunes de los PES.¹³

Las características del polvo pueden ser un factor limitante en la aplicabilidad de los PES en seco a varias operaciones industriales. Las partículas pegajosas o húmedas y las nieblas pueden ser recolectadas fácilmente, pero con frecuencia pueden ser difíciles de remover de los electrodos recolectores de los PES en seco. Los polvos con resistividades muy altas tampoco son apropiados para la recolección en PES en seco. Los PES en seco son susceptibles a hacer explosión en aplicaciones en donde se encuentran polvos flamables o explosivos.²

Los PES en húmedo pueden recolectar partículas pegajosas y nieblas, tanto como polvos altamente resistivos o explosivos. Los PES en húmedo generalmente no están limitados por las características del polvo, pero están limitados por las temperaturas del gas. Típicamente, las temperaturas de operación de los PES en húmedo no pueden exceder 170°F. Cuando se recolecta un polvo valioso que puede ser vendido o reciclado dentro del proceso, los PES en húmedo tampoco pudieran ser deseables, ya que el polvo es recolectado como un sedimento lodoso en húmedo que con gran probabilidad necesitaría un tratamiento adicional.^{2,4}

Por lo general los precipitadores electrostáticos no son apropiados para el uso en procesos que son altamente variables, ya que los cambios frecuentes en las condiciones de operación con probabilidad degradarían el rendimiento del PES. Los precipitadores electrostáticos también son difíciles de instalar en sitios que tienen espacio limitado debido a que los PES deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas necesarias para la recolección eficiente de partículas.¹

5.2.6 Costos de los Precipitadores Electrostáticos

Los costos de instalar y operar un PES incluyen tanto a los costos de capital como a los anuales. Los costos de capital son todos los costos iniciales del PES relacionados con el equipo. Los costos anuales son los costos directos de la operación y mantenimiento del PES durante un año, más costos indirectos tales como el gasto de mantenimiento; la recuperación del capital; e impuestos, aseguranza y cargos administrativos. Refiérase al capítulo 6 del *OAQPS Control Cost Manual* (Manual de Control de Costos de la OAQPS) para las ecuaciones de costo.¹³

5.2.6.1 Costos de Capital

La *total capital investment - TCI*, (inversión capital total) de los PES incluye todos los costos de capital iniciales, tanto directos como indirectos. Los costos de capital directos son los *purchased equipment costs - PEC* (costos del equipo adquirido) y los costos de instalación (cimientos, sistema eléctrico, tubería, etc.). Los costos indirectos se relacionan a la instalación e incluyen la ingeniería, la

construcción, los contratistas, el inicio de la obra, las pruebas y las contingencias. Los costos directos e indirectos de instalación se calculan como factores del *PEC*.¹⁴ La tabla 5.2-3 presenta los factores de costo de la *TCI* para los PES. Existen varios aspectos de los PES que impactan el *PEC*. Estos factores incluyen la velocidad de flujo del gas de entrada, la eficiencia de recolección, las características del polvo y del gas, y varios features estándares de diseño. El *PEC* se estima basándose en las especificaciones del PES y se correlaciona típicamente con la superficie de recolección de dos maneras, la ecuación Deutsch-Anderson o el método seccional.¹³ Refiérase al capítulo 6 del *OAQPS Control Cost Manual* para las ecuaciones de estimación de costos para los PES.

Traducción de Términos de la Figura 5.2-8

CALDERAS ACCIONADAS POR CARBON

PRODUCCION DE HIERRO Y ACERO

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)
(%)

Eficiencia de Recolección Cumulativa

	Extendedor, Bituminoso,	Forjado Abierto	Horno de
		Calidad de Datos: C,E	Calidad
(Inserte grafica):	de Datos: E	(Inserte grafica):	
	Fondo Húmedo, Bituminoso,		Hornos de
	Esmerilado,		Calidad de
	Calidad de Datos: E		
	Datos: C,D		
	Fondo Seco, Bituminoso,		
	Calidad de Datos: C, D		

Tamaño de las Partículas (µm)

Tamaño de las Partículas (µm)

PRODUCCION PRIMARIA DE COBRE

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)

(Inserte grafica):

Rostizador de Forjado Múltiple,
Calidad de Datos: D
Fundición Reverberatoria,
Calidad de Datos: E

Tamaño de las Partículas (µm)

Nota: La calidad de datos de refiere a las clasificaciones asignadas a los factores de emisión a partir de los cuales se calcularon las eficiencias (de la Referencia 8):
A = excelente, B = por encima del promedio
C = promedio D =por debajo del promedio
E = pobre

Figura 5.2-8. Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para Precipitadores Eletrostáticos en Calderas Accionadas por Carbón, Productores Primarios de Cobre, y Operaciones de Producción de

Hierro y Acero (Referencia 8).

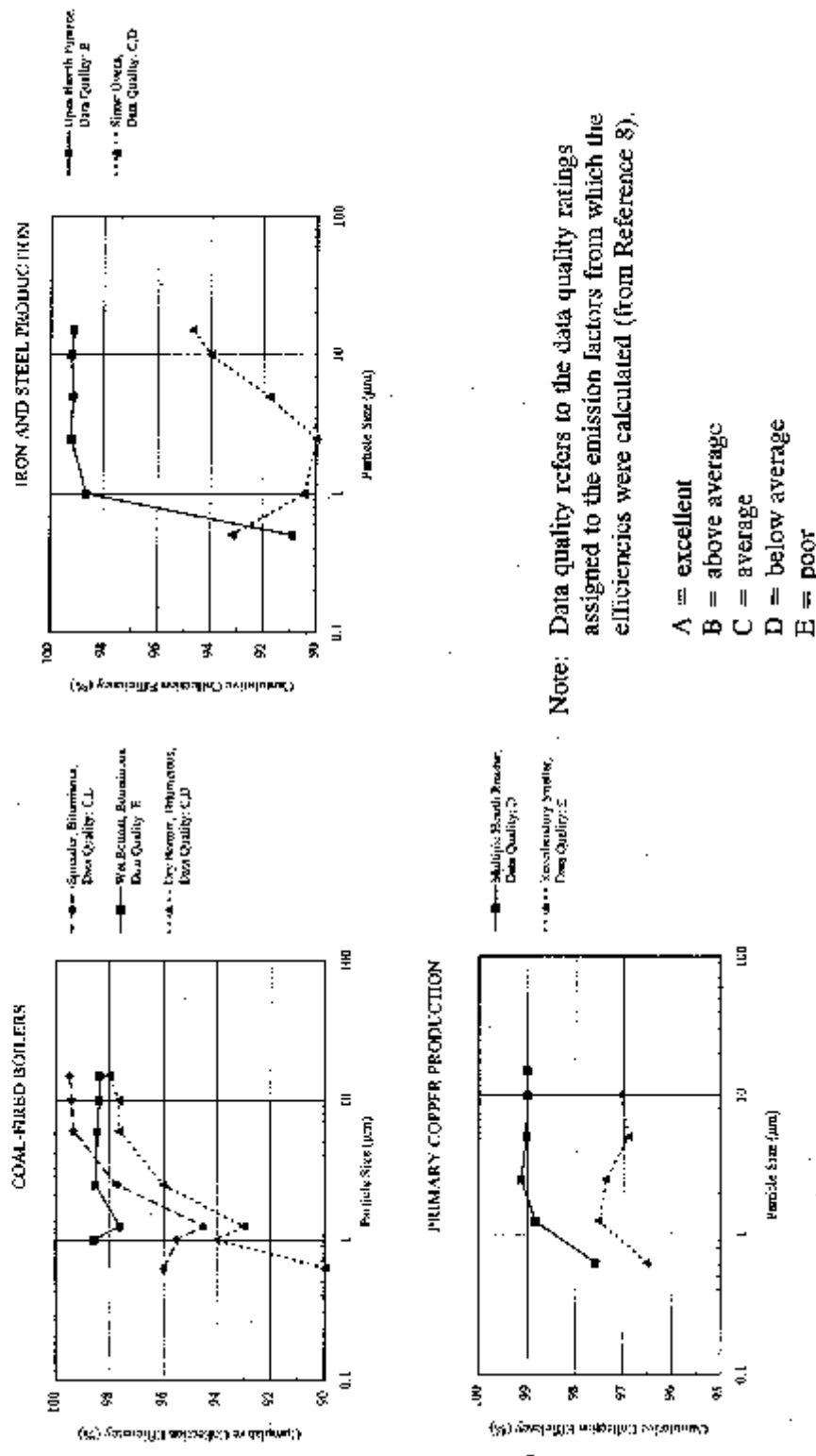


Figure 5.2-8. Cumulative Collection Efficiency Data for Electrostatic Precipitators at Coal-Fired Boilers, Primary Copper Producers, and Iron and Steel Production Operations (Reference 8).

Table 5.2-1. Eficiencias de Recolección de MP₁₀ y MP_{2.5} Cumulativa para PES en Combustores de Carbón, Operaciones Primarias de Cobre, y Operaciones de Producción de Hierro y Acero (de la Referencia 11)

Aplicación	Eficiencia de Recolección (porcentaje)	
	MP ₁₀	MP _{2.5}
Calderas Accionadas por Carbón		
Fondo seco (bituminoso)	97.7	96.0
Fogonero extendedor (bituminoso)	99.4	97.7
Fogonero extendedor (antracita)	98.4	98.5
Operación Primaria de Cobre		
Rostizador de forjado múltiple	99.0	99.1
Fundición Reverberatoria	97.1	97.4

Tabla 5.2-2. Aplicaciones Industriales Típicas de los Precipitadores Electrostáticos (de las Referencias 2 y 12)

Aplicación	Código de Categoría de la Fuente	Tipo de PES
Calderas de Servicios Públicos (Carbón, Petróleo)	1-01-002...004	PES en Seco, Placa-Alambre
Calderas Industriales (Carbón, Petróleo, Madera, Residuos Líquidos)	1-02-001...005 1-02-009, -013	PES en Seco, Placa-Alambre
Calderas Comerciales/Institucionales (Carbón, Petróleo, Madera)	1-03-001...005 1-03-009	PES en Seco, Placa-Alambre
Manufactura Química	3-01-001...999	Específico del Sitio

Aplicación	Código de Categoría de la Fuente	Tipo de PES
Procesamiento de Metales No Ferrosos (Primario y Secundario)		
Cobre	3-03-005 3-04-002	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Placa, Placa-Alambre, Tubo-Alambre, Placa de Marco Rígido
Plomo	3-03-010 3-04-004	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Placa, Placa-Alambre, Tubo-Alambre, Placa de Marco Rígido
Zinc	3-03-030 3-04-008	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Placa, Placa-Alambre, Tubo-Alambre, Placa de Marco Rígido
Aluminio	3-03-000...002 3-04-001	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Alambre, Tubo-Alambre, Placa de Marco Rígido
Otros	3-03-011...014 3-04-005...006 3-04-010...022	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Alambre, Tubo-Alambre
Procesamiento de Materiales Ferrosos		
Producción de Coque	3-03-003...004	PES en Húmedo, Tubo-Alambre
Producción de Ferroaleación	3-03-006...007	PES en Seco, Placa-Alambre
Producción de Hierro y Acero	3-03-008...009	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Alambre, Tubo-Alambre
Fundiciones de Hierro Gris	3-04-003	PES en Seco, Placa-Alambre
Fundiciones de Acero	3-04-007, -009	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Alambre, Tubo-Alambre
Refinerías de Petróleo e Industrias Relacionadas	3-06-001...999	PES en Seco, Placa-Alambre
Productos Minerales		
Manufactura de Cemento	3-05-006...007	PES en Seco, Placa-Alambre
Quarrying y Procesamiento de Piedra	3-05-020	Específico del Sitio
Otros	3-05-003...999	PES en Seco, PES en Húmedo, Placa-Alambre, Placa-Aguja
Madera, Pulpa y Papel	3-07-001	PES en Seco, Placa-Alambre, Placa-Marco Rígido
Incineración (Residuos Municipales)	5-01-001	PES en Seco, Placa-Alambre, Placa-Marco Rígido

Velocidad de Flujo de Entrada. La velocidad de flujo de entrada tiene el mayor efecto sobre la *TCI* porque determina el tamaño general del PES. A medida que la velocidad del gas aumenta también lo hace el tamaño del PES y, a su vez, los costos. Las velocidades típicas de flujo del gas para los PES son de 10,000 a 1,000,000 *actual cubic feet per minute - ACFM* (pies cúbicos reales por minuto).² Los costos del precipitador electrostático aumentan en forma aproximadamente lineal con la velocidad de flujo del gas, siendo la pendiente de las curvas de costo dependiente de los otros factores discutidos a continuación.

Eficiencia de Recolección. Los precipitadores electrostáticos están diseñados para lograr una eficiencia de recolección específica. Los costos de la *TCI* de los PES aumentan a medida que se logran eficiencias mayores. Para alcanzar las eficiencias de recolección más altas, los PES deben ser mayores para proporcionar mayores superficies de recolección. Además, las eficiencias extremadamente altas podrían requerir una instrumentación especial para el control y modificaciones internas para mejorar el flujo de gas y la eficiencia del golpeo. La figura 5.2-9 muestra el efecto de la eficiencia de recolección sobre los costos de la *TCI* para un PES.¹⁵

Características del Polvo. La distribución del tamaño de las partículas, la adhesividad y la resistividad son características del polvo que afectan los costos de los PES. La distribución del tamaño del polvo influye a la eficiencia de recolección general de los PES. Por ejemplo, las partículas en el intervalo de 0.1 a 1.0 : m son las más difíciles de recolectar para un PES. Si muchas de las partículas se encuentran dentro de este intervalo, será más difícil lograr una eficiencia de recolección determinada y se requerirá un PES más grande y costoso. Si el polvo es muy pegajoso, será necesario fabricar los PES en seco a partir de materiales más duraderos (y costosos) para soportar el golpeo intenso que se necesita para remover el polvo de los electrodos recolectores. Por esta razón, con frecuencia se prefiere un PES en húmedo para los polvos muy pegajosos, lo cual impulsa el incremento de los costos. La resistividad del polvo influye los costos, ya que las partículas altamente resistivas requerirán los gastos de operación adicionales por el acondicionamiento del gas de escape o el uso de los PES en húmedo.¹³

Características de la Corriente de Gas. Las características importantes de la corriente de gas son la temperatura, la humedad y la composición química. La temperatura de la corriente de gas afecta la resistividad de las partículas y, consecuentemente, la eficiencia y el costo de

Tabla 5.2-3. Factores de Costo de Capital para Precipitadores Electrostáticos
(de la Referencia 10).

Artículo de Costo	Factor
Costos Directos	
Costos de Equipo Adquirido	
PES + equipo auxiliar	Tal como se estime (A)
Instrumentación	0.10 A
Impuestos sobre la Venta	0.03 A
Transporte	<u>0.05 A</u>
Costo Total del Equipo Adquirido, (PEC)	B = 1.18 A
Costos Directos de Instalación	
Cimientos y soportes	0.04 B
Sistema eléctrico	0.50 B
Tubería	0.08 B
Insulación para ductos	0.01 B
Pintura	0.02 B
Costo Directo de Instalación Total	<u>0.02 B</u>
	0.67 B
Preparación del Sitio y Edificios	Tal como se requiere
<i>Total Direct Cost - DC</i> (Costo Directo Total)	(Sitio)
	1.67 B + Sitio
Costos Indirectos (instalación)	
Ingeniería	
Gasto por Construcción y Campo	0.20 B
Honorarios de Contratistas	0.20 B
Inicio de la Obra	0.10 B
Prueba de Rendimiento	0.01 B
Estudio del Modelo	0.01 B
Contingencias	0.02 B
<i>Total Indirect Costs - CI</i> (Costos Indirectos Totales)	<u>0.03 B</u>
	0.57 B
<i>TCI = DC + IC</i>	
	2.24 B + Sitio

los PES. Las corrientes muy húmedas y las neblinas por lo general requieren el uso de los PES en húmedo. La composición química de la corriente d gas podría restringir los materiales de construcción apropiados para los PES. La mayoría de los PES están contruídos con hierro

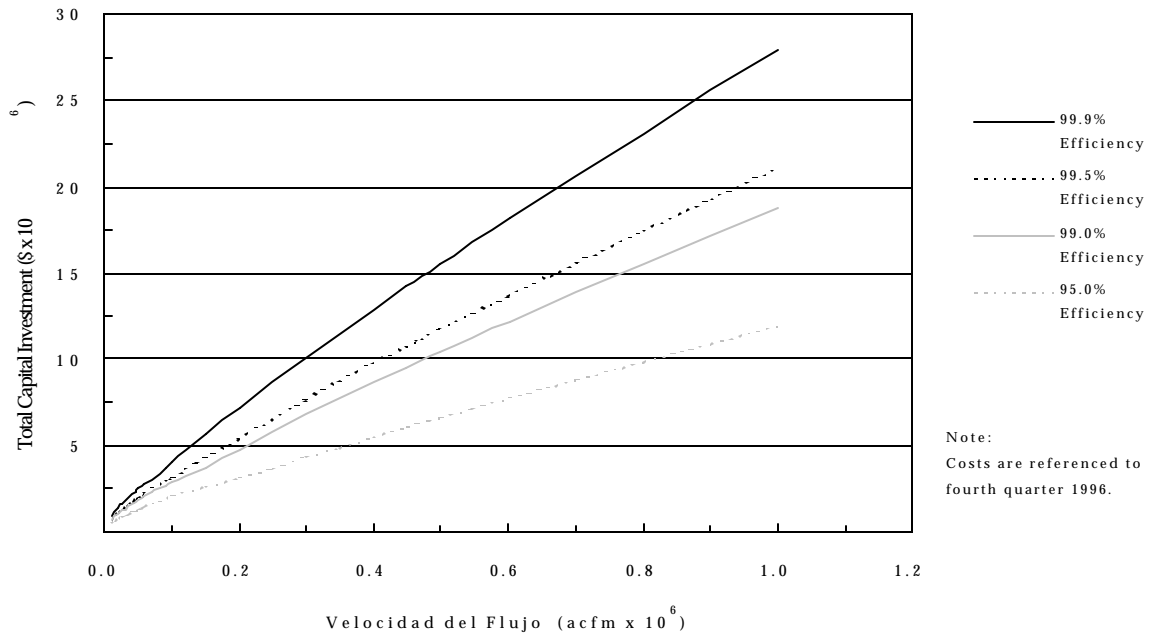


Figure 5.2-9. Effect of Design Collection Efficiency on ESP TCI Costs (Reference 14).

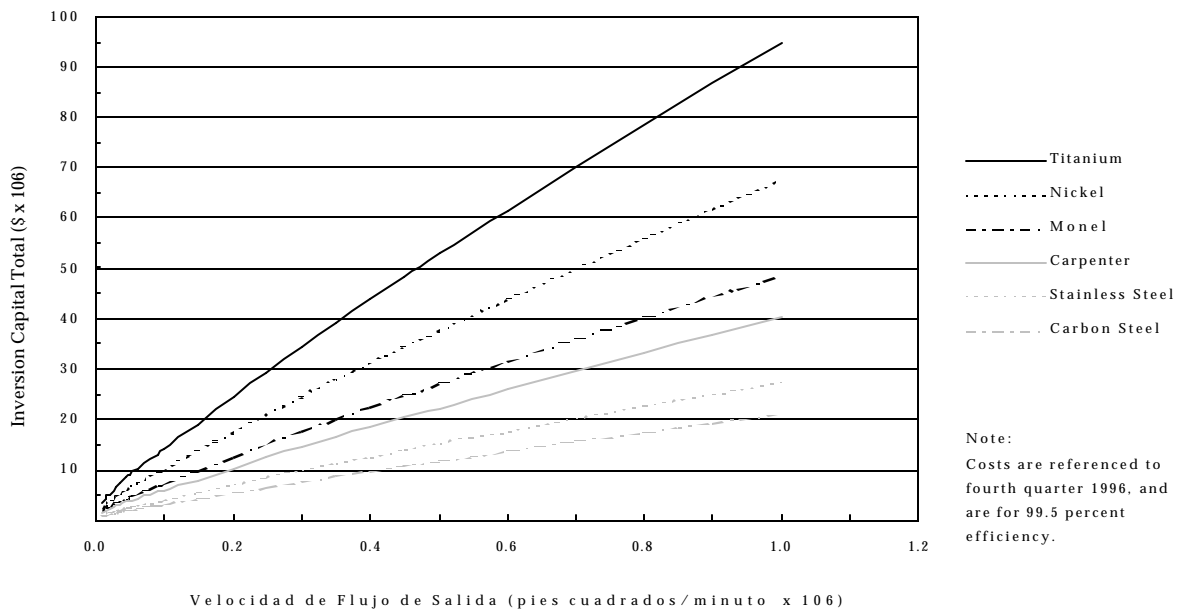


Figura 5.2-10. Efecto del Uso de Materiales Resistentes a la Corrosión en los Costos de Inversión Capital de los PES (Referencia 14)

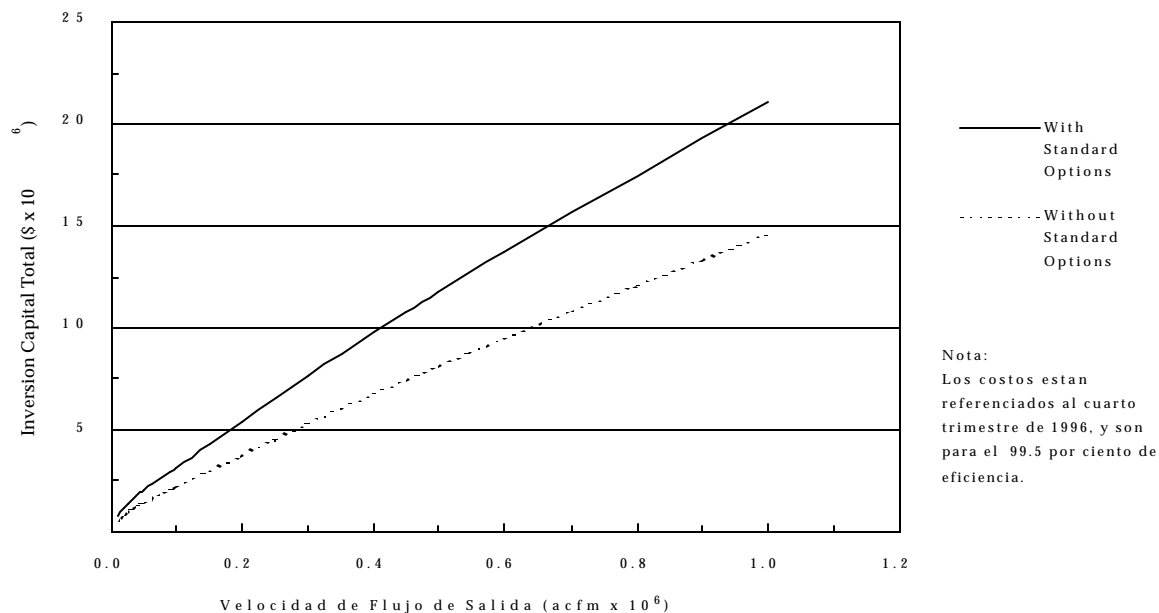


Figura 5.2-11. Costos de Inversión Capital Total para PES Con y Sin Varios Opciones de Diseño (Referencia 14).

de carbón; sin embargo cuando la corriente es altamente corrosiva, se necesitan materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable, *carpenter*, *monel*, níquel y titanio.¹³ La figura 5.2-10 muestra el impacto del uso de materiales resistentes a la corrosión sobre los costos de los PES.¹⁴

Características de Diseño. Existen varias características de diseño que son consideradas estándar para la mayoría de los PES y que pueden constituir hasta el 50% del *PEC*. Estas opciones incluyen boquillas de entrada y de salida, placas difusoras, auxiliares de tolva (calentones, detectores de nivel, etc.), *weather enclosures* (recipientes contra la intemperie), acceso a escaleras, soportes estructurales, e insulación.¹³ La figura 5.2-11 muestra los costos de los PES con y sin estas características de diseño estándares. Los PES en húmedo y los diseños de marco rígido típicamente tienen gastos (de capital) iniciales altos que los PES en seco y de placa-alambre.

5.2.6.2 Costos Anuales

El costo anual total de un PES consiste en costos tanto directos como indirectos. Los costos anuales directos son aquellos asociados con la operación y el mantenimiento de los PES. Estos incluyen la mano de obra (de operación, supervisora, coordinadora, y de mantenimiento), materiales para mantenimiento, materiales para operación, electricidad, desecho del polvo, tratamiento de aguas residuales (en los PES en húmedo), aire comprimido (para los golpeadores), los agentes acondicionadores, y los costos de calentamiento y enfriamiento.¹³ Algunos costos de operación no se aplican a todos los PES. Para los PES que recolectan polvos que no tienen valor alguno, el desecho del polvo puede ser costoso. Los agentes acondicionadores de gas se usan para PES que necesitan recolectar polvos altamente resistentes. Algunas instalaciones de PES también requieren el calentamiento o el enfriamiento de la

corriente de gas para una operación efectiva. El costo del combustible para el calentamiento puede ser significativo; los costos del agua para el enfriamiento por lo general no lo son.¹³

Los costos anuales indirectos incluyen los impuestos, la aseguranza, los costos administrativos, los gastos de mantenimiento, y la recuperación del capital. Todos estos costos excepto los gastos de mantenimiento dependen del *TCI*. La tabla 5.2-4 enumera los parámetros de costo anual que impactan los costos de los PES, con valores típicos provistos para cada parámetro. La tabla 5.2-5 proporciona los factores de costo anual para los PES. Es difícil generalizar estos costos para todos los PES, ya que los costos anuales son muy específicos del sitio.¹³

5.2.7 y Otros Impactos Ambientales Secundarios.

Los impactos ambientales de la operación de los PES incluyen a los asociados con la demanda de energía, la generación de residuos sólidos en la forma del polvo recolectado, y contaminación del agua para los PES en húmedo. Los requisitos de energía para la operación de un PES consiste principalmente de la demanda de electricidad para la operación del ventilador y la generación del campo eléctrico, y la limpieza. La potencia del ventilador depende de la caída de presión a través del PES, la velocidad de flujo, y el tiempo de operación. Suponiendo una eficiencia del motor del ventilador de 65 por ciento y una relación de la gravedad específica del gas a la del aire igual a 1.0, el requisito de potencia del ventilador puede ser estimada a partir de la ecuación siguiente:¹³

$$\text{Potencia del Ventilador (kW-hora/año)} = 1.81 \times 10^{-4} (V)(P)(t) \quad (\text{Ecuación 5.2-1})$$

en donde V es la velocidad de flujo del gas ($ACFM$), P es la caída de presión (pulgadas de H_2O), t es el tiempo de operación anual (hora/año), y 1.81×10^{-4} es un factor para la conversión de las unidades.

Los requisitos de potencia de operación para los electrodos y la energía para los sistemas de golpeo pueden ser estimados a partir de la relación siguiente:¹³

$$\text{Potencia d Operación (kW-hora/año)} = 1.94 \times 10^{-3} (A)(t) \quad (\text{Ecuación 5.2-2})$$

en donde A es la superficie de la placa del PES (en pies cuadrados), t es el tiempo de opearción anual (in hora/año), y 1.94×10^{-3} es un factor para la conversión de las unidades.

Tabla 5.2-4 (Inglés). Annual Cost Parameters for Electrostatic Precipitators (Reference 14).

Parameter	Description	Typical Values
Direct Cost Parameters		
Operating factor (OF)	Hours of scrubber operation per year	8,640 hr/yr
Operator labor rate (OR)	Operator labor pay rate	\$12.50/hr ^a
Operator shift factor (OS)	Fraction of operator shift on scrubber	0.25 ^b
Supervisor labor factor (SF)	Fraction of operator labor cost	0.15 ^b
Coordinator labor factor (CF)	Fraction of operator labor cost	0.33 ^b
Maintenance labor (ML)	Dependent on plate collector area	Site specific
Maintenance materials factor (MF)	Fraction of Purchased Equipment Cost	0.01 ^b
Electricity rate (ER)	Cost of electricity	\$0.07/kW-hr ^a
Chemicals (C)	Cost of chemical conditioning agents	Site specific (sect. 5.1)
Compressed air (CA)	Cost of compressed air for rappers	\$0.18/1000 scf ^b
Wastewater treatment (W)	Cost of treating wet ESP effluent	\$1.55-\$2.55/1000 gal ^b
Waste disposal (D)	Cost of disposing of dust/sludge	\$20-30/ton ^a
Indirect Cost Parameters		
Overhead factor (OV)	Fraction of total labor and (MM) costs	0.60 ^b
Annual interest rate (I)	Opportunity cost of the capital	7 percent ^b
Operating life (n)	Expected operating life of scrubber	20 years ^b
Capital recovery factor (CRF)	Function of (n) and (I)	0.0944 ^c
Taxes (TAX)	Fraction of the TCI ^d	0.01 ^b
Insurance (INS)	Fraction of the TCI ^d	0.01 ^b
Administrative costs (AC)	Fraction of the TCI ^d	0.02 ^b

^a Estimated for 1996 from currently available information.

^b Estimates from "COST-AIR" Control Cost Spreadsheets (Reference 14).

^c Capital Recovery Factor is calculated from the following formula: $CRF = \{I(1 + I)^n\} \div \{(1 + I)^n - 1\}$, where I = interest rate (fraction) and n = operating life (years).

^d The total capital investment (TCI) can be escalated to current values by using the Vatavuk Air Pollution Control Cost Indices (VAPCCI), described in Appendix B.

Tabla 5.2-5 (Inglés). *Annual Cost Factors for Electrostatic Precipitators (Reference 14).*

Cost Item	Formula ^a	Factor
Direct Costs		
Labor		
Operator (OL)	(OF)×(OR)×(OS)	A
Supervisor (SL)	(SF)×(OL)	0.15 A
Coordinator (CL)	(CF)×(OL)	0.33 A
Maintenance (ML)	Site specific	ML
Maintenance materials (MM)	(MF)×(PEC)	0.01 PEC
Electricity (E)	Power ^b × (ER)	E
Chemicals (C)	Site specific	C
Compressed air (CA)	(CA)	CA
Wastewater treatment (W)	(W)	W
Waste disposal (D)	(D)	<u>D</u>
Total Direct Cost (DC)		1.48 A + ML + 0.01 PEC + E + C + CA + W + D
Indirect Costs		
Overhead	(OV)×(OL+SL+CL +ML+MM)	0.89 A + 0.6 ML + 0.006 PEC
Capital Recovery	(CRF)×(TCI)	0.1424 TCI
Taxes	(TAX)×(TCI)	0.01 TCI
Insurance	(INS)×(TCI)	0.01 TCI
Administrative Costs	(AC)×(TCI)	<u>0.02 TCI</u>
Total Indirect Cost (IC)		0.89 A + 0.6 ML + 0.006 PEC + 0.1824 TCI
Total Annual Cost (DC + IC)		2.37 A + 1.6 ML + 0.016 PEC + 0.1824 TCI + E + C + CA + W + D

^a Includes values also described in Table 5.2-4.

^b Equal to total power requirements, e.g. fan, pump, etc.

Tabla 5.2-4. Parámetros de Costo Anuales para los Precipitadores for Electrostáticos (Referencia 14).

Parameter	Description	Typical Values
Parámetros de Costo Directos		
Factor de Operación (FO)	Horas de operación de absorbedores por año	8,640 horas/año
Salario de Mano de Obra del Operador (SO)	Salario de la mano de obra del operador	\$12.50/hora ^a
Factor de Turno del Operador (OS)	Fracción del turno en el absorbedor	0.25 ^b
Factor de Mano de Obra del Supervisor (SF)	Fracción del costo de la mano de obra del operador	0.15 ^b
Coordinador labor factor (CF)	Fracción del costo de la MO del operador	0.33 ^b
Maintenance labor (ML)	Dependiente de la superficie de la placa recolectora	Específico del Sitio
Maintenance materials factor (MF)	Fracción del Costo del Equipo Adquirido	0.01 ^b
Electricity rate (ER)	Costo de la electricidad	\$0.07/kW-hora ^a
Chemicals (C)	Costo de los agentes químicos acondicionadores	Específico del Sitio (secc. 5.1)
Compressed air (CA)	Costo del aire comprimido para los <i>rappers</i>	\$0.18/1000 pies cúbicos ^a
Wastewater treatment (W)	Costo del tratamiento del efluente de PES húmedo	\$1.55-\$2.55/1000 galones ^a
Waste disposal (D)	Costo del desecho de polvo/ <i>sludge</i>	\$20-30/tonelada ^a
Parámetros de Costo Indirectos		
Factor de <i>Overhead</i> (OV)	Fracción de la Mano de Obra Total y Costos (MM)	0.60 ^b
Tasa de Interés Anual (I)	Costo de Oportunidad del Capital	7 por ciento ^b
Vida de Operación (n)	Expectativa de Vida de Operación del Absorbedor	20 años ^b
Factor de Recuperación del Capital (CRF)	Función of (n) and (I)	0.0944 ^c
Impuestos (IMP)	Fracción del <i>TCI</i> ^d	0.01 ^b
Aseguranza (SEG)	Fracción del <i>TCI</i> ^d	0.01 ^b
Costos Administrativos (CA)	Fracción del <i>TCI</i> ^d	0.02 ^b

^a Estimados para 1996 a partir de la información disponible en la actualidad.

^b Estimaciones provenientes de las Hojas de Trabajo para el Control de Costos "CO\$T-AIR" (Referencia 14).

^c El *Capital Recovery Factor - CRF* (Factor de Recuperación del Capital) se calcula a partir de la siguiente fórmula: $CRF = \{(1 + I)^n\} \div \{(1 + I)^n - 1\}$, en donde I = tasa de interés (fracción) y n = vida de operación (años).

^d La inversión de capital total (*TCI*) puede ser escalada a los valores actuales utilizando los *Vatavuk Air Pollution Control Cost Indices - VAPCCI* (Índices de Costo Vatavuk para el Control de la Contaminación del Aire) descritos en el apéndice B.

Tabla 5.2-5. Factores de Costo Anuales para los Precipitadores Electrostáticos
(Referencia 14).

Artículo de Costo	Fórmula ^a	Factor
Costos Directos		
Mano de Obra		
Operador (MOO)	$(FO) \times (SO) \times (TO)$	A
Supervisor (MOS)	$(FS) \times (MOO)$	0.15 A
Coordinador (MOC)	$(FC) \times (MOO)$	0.33 A
Mantenimiento (MOM)	Específico del Sitio	MOM
Materiales de Mantenimiento (MM)	$(FM) \times (PEC)$	0.01 PEC
Electricidad (E)	Potencia ^b \times (TE)	E
Sustancias Químicas (Q)	Específico del Sitio	C
Aire Comprimido (AC)	(AC)	AC
Tratamiento de Aguas Residuales (TAR)	(TAR)	AR
Desecho de Residuos (D)	(D)	<u>D</u>
<i>Direct Cost - CD</i> (Costo Directo Total)		1.48 A + MOM + 0.01 PEC + E + Q + AC + TA + D
Costos Indirectos		
Gastos de Mantenimiento	$(GM) \times (MOO + MOS + MOC + MOM + MM)$	0.89 A + 0.6 MOM + 0.006 PEC
Recuperación del Capital	$(CRF) \times (TCI)$	0.1424 TCI
Impuestos	$(IMP) \times (TCI)$	0.01 TCI
Aseguranza	$(SEG) \times (TCI)$	0.01 TCI
Costos Administrativos	$(AC) \times (TCI)$	<u>0.02 TCI</u>
<i>Indirect Cost - CD</i> (Costo Indirecto Total)		0.89 A + 0.6 ML + 0.006 PEC + 0.1824 TCI
<i>Total Annual Cost - CD + CI</i> (Costo Anual Total)		2.37 A + 1.6 MOM + 0.016 PEC + 0.1824 TCI + E + Q + AC + TA + D

Los PES en húmedo tienen requisitos adicionales de energía para bombear el líquido de enjuague hacia el PES. Los requisitos de potencia de la bomba pueden ser calculados como sigue:¹³

$$\text{Potencia de la Bomba (kW-hora/año)} = (0.746(Q)(Z)(S_g)(t)) / (3960 O) \text{ (Ecuación 5.2-3)}$$

en donde Q , es la velocidad de flujo del líquido (en galones/minuto), Z es la cabeza de fluido (en pies), S_g es la gravedad específica del líquido, t es el tiempo de operación anual (en hors/año), O es la eficiencia del motor de la bomba, y 0.746 y 3960 son factores para la conversión de las unidades.

El residuo sólido se genera a partir de la operación de los PES en la forma de polvo recolectado. Aunque el polvo es generalmente inerte y no tóxico, el desecho del polvo es un factor principal de la operación de un PES. Con algunas operaciones del PES, el polvo puede ser utilizado de nuevo en el proceso o en las instalaciones o vendido. De otra manera, el polvo debe ser enviado fuera del sitio. La contaminación del agua es una preocupación para los PES en húmedo. Algunas instalaciones podrían requerir plantas para el tratamiento del agua y otras modificaciones para manejar la descarga de sedimento lodoso proveniente de los PES en húmedo.^{2,13}

5.2.8 Referencias para la Sección 5.2

1. Cooper, C.D and F.C. Alley. *Air Pollution Control: A Design Approach*. 2nd ed. Waveland Press, Prospect Heights, Illinois. 1994.
2. The Electrostatic Precipitator Manual (Revised). The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. March 1996.
3. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a, NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
4. Steinsvaag, R. Overview of Electrostatic Precipitators. *Plant Engineering*. July 10, 1995.
5. Mastropietro, T. and P. Dhargalkar. Electrostatic Precipitator Designs Evolve to meet Tighter Regulations. *Pulp & Paper*. September 1991.
6. Oglesby, S., Jr. Future Directions of Particulate Control Technology: A Perspective. *J. Air Waste Management Assoc.* 40(8): 1184-1185. August 1990.
7. Scholtens, M.J. *Air Pollution Control: A Comprehensive Look*. *Pollution Engineering*. May 1991.
8. C. Sedman, N. Plaks, W. Marchant, and G. Nichols. Advances in Fine Particle Control Technology. Presented at the Ukraine Ministry of Energy and Electrification Conference on Power Plant Air Pollution Control Technology, in Kiev, The Ukraine, September 9 - 10, 1996.
9. C. Sedman, N. Plaks, W. Marchant, and G. Nichols. Advances in Fine Particle Control Technology. Presented at the Ukraine Ministry of Energy and Electrification Conference on Power Plant Air Pollution Control Technology, in Kiev, The Ukraine, September 9 - 10, 1996.
10. ESP Newsletter. The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. May 1996.
11. Rikhter, L.A. et. al. Improving the Efficiency of Removal of High-resistance Ash in Electrostatic Precipitators by Chemical Conditioning of Flue Gases. *Thermal Engineering*. 38:3. March 1991.
12. Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). Volume I (Fifth Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.
13. Source Category Emission Reductions with Particulate Matter and Precursor Control Techniques. Prepared for K. Woodard, U. S. Environmental Protection Agency, Research

Triangle Park, North Carolina (AQSSD/IPSG), under Work Assignment II-16 (EPA Contract No. 68-03-0034), "Evaluation of Fine Particulate Matter Control." *September 30, 1996.*

14. OAQPS Control Cost Manual (Fourth Edition, EPA 450/3-90-006) U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. January 1990.
15. Vatavuk, W.M. "CO\$T-AIR" Control Cost Spreadsheets. Provided by the Innovative Strategies and Economics Group of the Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.

5.3 FILTROS DE TELA

Esta sección trata de los principios básicos de operación del filtro de tela, los métodos de limpieza, la selección de la tela, los costos, y la aplicabilidad a varias industrias. Los filtros de tela son un medio popular de separar partículas de una corriente de gas debido a su eficiencia relativamente alta y su aplicabilidad a muchas situaciones. Los filtros de tela pueden estar hechos de telas ya sea tejidas o afelpadas y pueden encontrarse en la forma de hojas, cartuchos, o bolsas, con un número de unidades de filtro de tela individuales albergados juntos en grupo. Las bolsas son hasta el momento el tipo mucho más común de filtro de tela, de ahí el uso del término “casas de bolsas” para describir a los filtros de tela en general.

Los mecanismos principales para la recolección de partículas de los filtros de tela son la impacción inercial, la difusión por movimiento browniano, y la interjección. Durante la filtración por tela, el gas polvoriento es aspirado a través de la tela por ventiladores de corriente forzada. La tela es responsable de parte de la filtración, pero actúa más significativamente como soporte para la capa de polvo que se acumula. La capa de polvo, también conocida como pasta de polvo, es un filtro altamente eficiente, aún para partículas sub-micrónicas. Las telas tejidas dependen de las capacidades de filtración de la pasta de polvo mucho más que de las telas afelpadas.

Los filtros de tela poseen algunas ventajas claves sobre otros tipos de dispositivos para la recolección de partículas. Junto con las altísimas eficiencias de recolección, también tienen la flexibilidad para tratar muchos tipos de polvos y un amplio rango de flujos volumétricos de gas. Los filtros de tela pueden ser operados con caídas de presión bajas. Los filtros de tela también tienen algunas desventajas potenciales. En general, están limitados a filtrar corrientes secas. Además, las temperaturas altas y ciertas sustancias químicas pueden dañar ciertas telas. Los filtros de tela también tienen el potencial de incendio o explosión, y pueden requerir una gran superficie para su instalación.¹ El diseño apropiado puede minimizar o eliminar estas desventajas.

5.3.1 Recolección de Partículas y Mecanismos de Penetración

La captura de partículas durante la filtración por tela es debida principalmente a alguna combinación de impacción inercial, difusión e interjección directa. La recolección también puede ocurrir debido a la sedimentación gravitatoria y la atracción electrostática, pero generalmente en un menor grado.² La figura 5.3-1 ilustra estos cinco mecanismos de recolección de partículas.³

La impacción inercial ocurre como resultado de un cambio en la velocidad entre un fluido, tal como el aire, y una partícula suspendida en el fluido. A medida que el fluido se acerca a un obstáculo se acelerará y cambiará de dirección para pasar alrededor del objeto. Dependiendo de la masa de la partícula, podría no ser capaz de adaptarse a la aceleración del fluido y se desarrollará una diferencia en velocidad entre la partícula y la corriente de fluido.

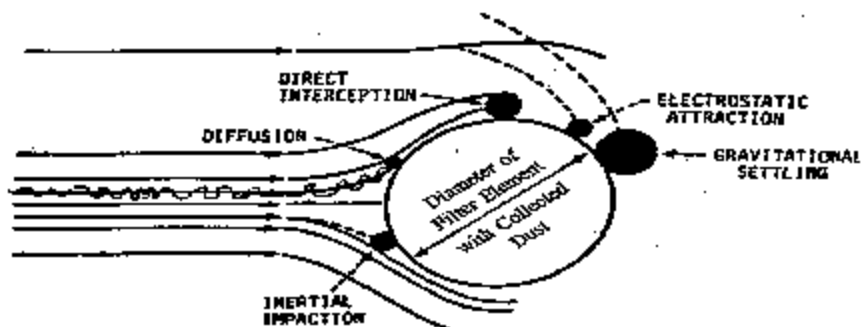


Figure 5.3-1. Collection Mechanisms of Fabric Filtration (from Reference 3).

Traducción de términos de la figura 5-2.1

<i>Direct Interception</i> / Intersección directa electrostática	<i>Electrostatic attraction</i> / Atracción electrostática
<i>Inertial Impaction</i> / impacción Inercial gravitacional	<i>Gravitational settling</i> / Asentamiento gravitacional
<i>Diameter of Filter Element with Collected Dust</i> / Diámetro del Elemento de Filtro con Polvo Recolectado	<i>Diffusion</i> / Difusión

Figura 5.3-1. Mecanismos de Recolección de la Filtración por Tela (de la Referencia 3).

La inercia mantendrá el movimiento hacia adelante de la partícula hacia el objeto, pero el fluido tratará de arrastrar la partícula alrededor del obstáculo. El movimiento resultante de la partícula es una combinación de estas fuerzas de arrastre del fluido y de inercia. Esto resulta en la impacción en el caso de las partículas en donde domina la inercia, y el paso libre para aquellas partículas abrumadas por el arrastre del fluido.²

La recolección por difusión ocurre como resultado de tanto el movimiento del fluido y el movimiento (al azar) browniano de las partículas. Los efectos de la recolección difusional son más significativos para las partículas menores de 1 micra (μm) de diámetro.² Otro mecanismo de recolección, la intersección directa, ocurre cuando una partícula se encuentra dentro de un radio de una partícula de distancia de un obstáculo. El camino que esta partícula tome puede ser el resultado de inercia, difusión, o movimiento de fluidos.²

La sedimentación gravitacional, o sea la caída de partículas individuales o aglomeradas, es un mecanismo de recolección menor para las operaciones de filtro de tela.² La carga electrostática puede jugar un papel importante en la recolección y la aglomeración de las partículas en algunas situaciones. Con el objeto de maximizar el efecto electrostático, las características de las partículas deben ser entendidas antes de seleccionar la tela. Véase la sección 6, Tecnologías Emergentes, para leer más discusiones sobre los efectos electrostáticos en la filtración por tela.

Debido a la física de cada mecanismo de recolección, el tamaño de las partículas determinará la predominancia de un mecanismo de recolección sobre otro. Por lo general, a medida que el tamaño de las partículas aumenta, la predominancia del mecanismo de recolección por difusión aumenta, suponiendo que los otros parámetros permanezcan constantes. A medida que el tamaño de las partículas aumenta, el mecanismo de recolección por impacción muy probablemente aumentará. La combinación de estos dos efectos principales de recolección contribuye a una eficiencia mínima a un tamaño de partículas determinado, tal como se ilustra en la figura 5.3-2, una gráfica de la eficiencia de recolección fraccionada de filtros de tela contra el tamaño aerodinámico de las partículas.²

La tela en sí también es un factor en la recolección y la penetración de las partículas. En las etapas de filtración iniciales en donde la tela generalmente se encuentra expuesta, la tela es responsable de cierta filtración. Sin embargo, con mayor relevancia, ésta actúa como un soporte para la capa de polvo que se acumula durante el curso de la operación del filtro de tela. El polvo o la pasta del filtro es un filtro altamente eficiente, aún para partículas sub-micrométricas. En términos del tipo de tela, las telas tejidas dependen de las capacidades de filtración de la pasta de polvo mucho más que las telas afelpadas.

La estructura de la tela, particularmente para las telas tejidas, también es muy importante para la recolección de partículas. Los poros grandes y una superficie con un gran espacio libre dentro de la tela contribuyen a una eliminación baja de las partículas. La captura de partículas en las telas tejidas es mejorada por las fibras pequeñas (conocidas como fabriles) las cuales se proyectan dentro de los poros. El polvo se puede depositar sobre los fabriles y hacer puente atravesando los poros, lo cual permite que se acumule una pasta en el filtro y aumente la eficiencia de recolección. Las telas pueden tener tamaños de poro similares y características de recolección muy diferentes debido al número de fabriles que poseen. Las propiedades electrostáticas de las fibras también son críticas. Las diversas fibras tienen diferentes características electrostáticas y de superficie. La intensidad de la carga electrostática de la tela tiene un efecto particular sobre la eficiencia de recolección de partículas y es una función de las propiedades de la tela y de la aspereza de la superficie. La velocidad de la disipación de la carga afecta cómo se libera el polvo de la tela y que tan fácilmente se puede limpiar la tela.

La relación gas a tela (G/T) es una consideración de diseño importante y tiene un efecto principal en los mecanismos de recolección de partículas. Esta es una relación de la velocidad de flujo volumétrico del gas por unidad de superficie filtrante, y generalmente se expresa en unidades de pies cúbicos por minuto de gas por pie cuadrado de tela $[(ft^3/min)/ft^2]$. Puesto que estas unidades pueden ser reducidas a pies por minuto (ft/min), a la relación G/T también se le refiere como la velocidad del frente.⁴ En general, a medida que la velocidad del frente aumenta, la eficiencia de la recolección por impacción aumenta y la eficiencia de recolección difusional disminuye.² Las velocidades de superficie más altas permiten el uso de filtro de telas más pequeños, siempre que todo lo demás permanezca constante. Sin embargo, a medida que la velocidad del frente aumenta, hay un aumento de caída de presión, un aumento de la penetración de las partículas, una mayor cobertura de la tela, una limpieza más frecuente, y una vida reducida de las bolsas. La TABLA 5.3-1 muestra las relaciones Recomendadas de G/T para varios polvos Industriales.^{4,16}

La mayoría de los polvo que penetra el filtro es un resultado del polvo que se desprende durante la limpieza y penetra en el lado limpio, y del polvo que se afloja durante la limpieza y no puede resistir desprenderse cuando resume el flujo.² La mayoría de las partículas sub-micrométricas penetran la tela pasando directamente a través de los poros o debido a una fuga.² Las fugas ocurren cuando las partículas emigran a través de la pasta o masa espesa del filtro y de la tela mediante la captura y el re-encauzamiento continuos. Las fugas son más comunes con las partículas lisas y con la ausencia de fuerzas electrostáticas significantes.²

5.3.2 Tipos de Filtros de Tela

Existe una amplia variedad de materiales que pueden ser tejidos o afelpados para producir telas efectivas, y hay muchos tamaños y arreglos diferentes de bolsas que pueden ser utilizados. Aunque la presencia de una pasta de polvo aumenta la eficiencia de recolección a medida que la pasta engruesa, también restringe el flujo del gas. Esto aumenta la caída de presión y los requisitos de energía. Para operar un filtro de tela continuamente, el polvo debe ser limpiado de los filtros y removido del filtro de tela de manera periódica. Los filtros de telas se clasifican con frecuencia según su método de limpieza. Los tres tipos principales de mecanismos de limpieza de los filtros de tela son; agiotador mecánico, el aire invertido, el pulsorreactor. Estos tipos se presentan a continuación junto con una breve discusión de otros tipos menos comunes de métodos de limpieza y configuraciones de filtros de tela.

Tabla 5.3-1. Relaciones de Gas a Tela Recomendadas (en pies cúbicos reales por minuto/pies cuadrados, *acfm/ft²*) para Aplicaciones Industriales Comunes de los Filtros de Tela. (Referencias 4 y 13)

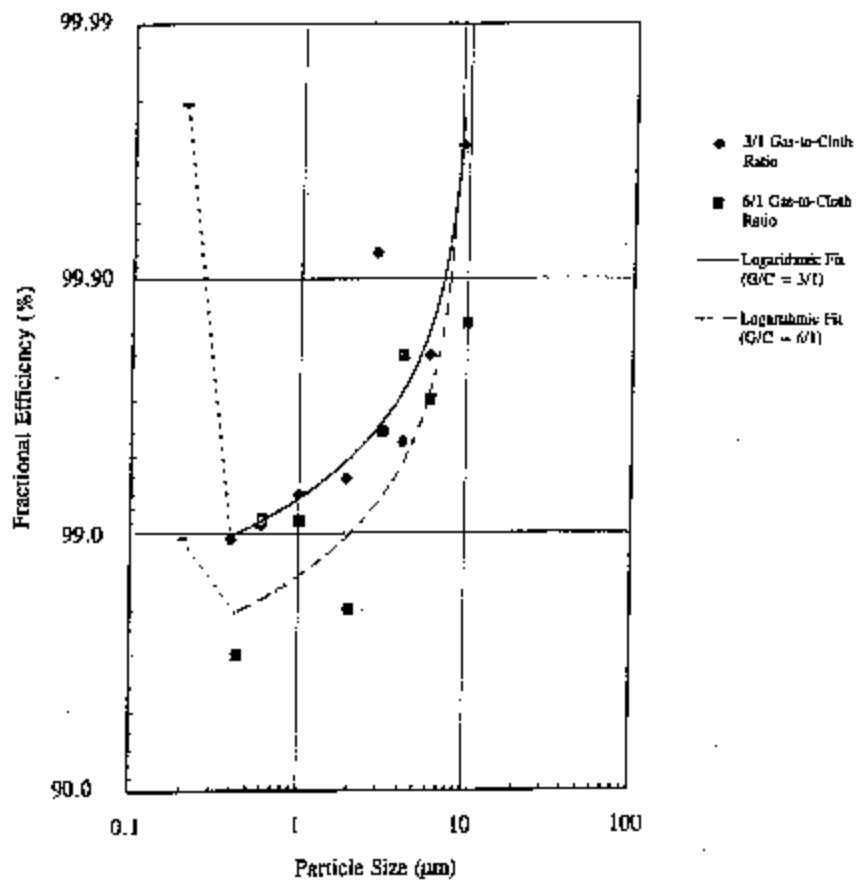


Figure 5.3-2. Fractional Efficiency of Fabric Filters vs. Particle Size (from Reference 2).

Figura 5.3-2. Eficiencia Fraccional de Filtros de Tela V.S. Tamaño de las Partículas (Referencia 2).

Traducción de términos de la figura 5-2.1

Fractonial Efficiency/ Eficiencia fraccionada	3/1 Gas-to-Cloth Ratio = Relación Gas/Tela de 3/1
Inertial Impaction = Impacción Inercial	6/1 Gas-to-Cloth Ratio = Relación Gas/Tela de 6/1
Particle Size = Tamaño de las Partículas	Logarithmic Fit = Ajuste logarítmico

5.3.2.1 Filtros de Tela Limpiados por Agitador

La agitación ha sido un método popular de limpieza durante muchos años debido a su sencillez tanto como su efectividad. Los filtros de tela lavados por agitador que utilizan telas tejidas escogidas especialmente son más efectivos que otros tipos de filtros de tela para muchas aplicaciones.² Para unidades pequeñas, la agitación puede ser lograda manualmente. Los filtros de tela grandes requieren agitación mecánica. Para ambos casos, la operación es básicamente la misma. En general, el gas polvoriento entra por un tubo de entrada al filtro de tela lavado por agitación y las partículas muy grandes son removidas de la corriente cuando se estrellan contra la placa de traba en el conducto de salida y caen dentro de la tolva. El gas cargado de partículas es atraído desde abajo de una placa de celda en el piso hacia dentro de las bolsas de filtro. El gas prosigue desde el interior de las bolsas hacia fuera y a través del tubo de salida. Las partículas son recolectadas sobre a superficie interior de las bolsas y se acumula una pasta en el filtro.

Un mecanismo típico de una unidad de filtro de tela limpiada por agitación mecánica se muestra en la figura 5.3-3.¹ En las unidades de agitación mecánica, las partes superiores de las bolsas se encuentran unidas a una barra agitadora. Cuando las bolsas se limpian, la barra se mueve rápidamente, generalmente en una dirección horizontal. Este movimiento flexiona la tela, causando que la pasta de polvo se resquebre y caiga lejos de la tela y dentro de la tolva. Un mecanismo agitador típico se muestra en la figura 5.3-4.² Alguna fracción de la pasta del filtro permanecerá sobre el interior de la bolsa de filtración; tal como se discutió en la parte superior, ésto es deseable y también necesario para mantener una eficiencia de recolección alta consistentemente. La cantidad de polvo que se remueve durante la limpieza puede ser controlada regulando la frecuencia, la amplitud, y la duración de los ciclos de agitación. En algunos diseños, el flujo invertido de aire se usa para mejorar la remoción de polvo.

El flujo del gas a través de las bolsas debe ser interrumpido durante el ciclo de limpieza para permitir que la pasta del filtro sea liberada de la tela y para prevenir que el polvo se vaya moviendo a lo largo de la bolsa durante la agitación. Con el objeto de lograr ésto, los filtros de tela limpiados por agitación se diseñan con frecuencia con varios compartimientos separados. Cada compartimiento después puede ser aislado del flujo de gas y limpiado mientras los otros compartimientos continúan a filtrar la corriente.

Los filtros de tela limpiados por agitación son muy flexibles en su diseño, permitiendo diferentes tipos de telas, arreglos de bolsas, y tamaños de filtros de tela. Esto permite que los filtros de tela limpiados por agitación tengan muchas aplicaciones, con sólo algunas limitaciones. Los filtros de tela que se limpian con agitador necesitan un polvo que se desprenda de la tela con bastante facilidad, o sino la tela se dañaría por el exceso de agitación y resultaría en una falla de la bolsa. Las telas de vidrio son particularmente susceptibles a la

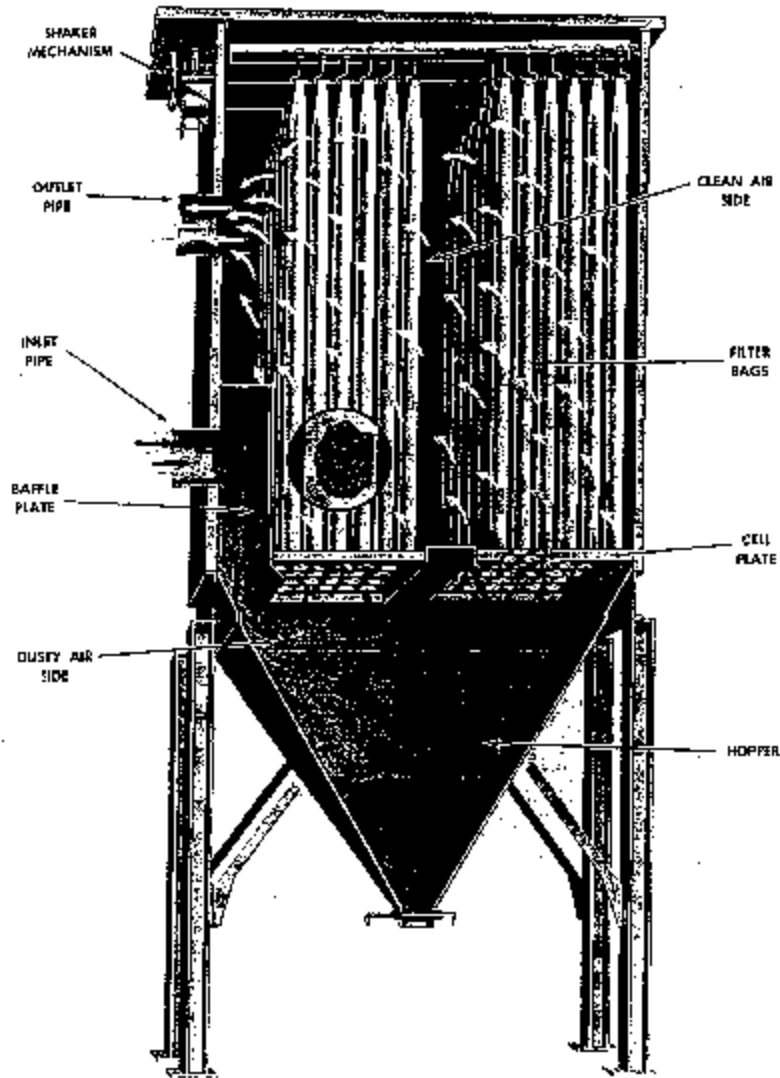
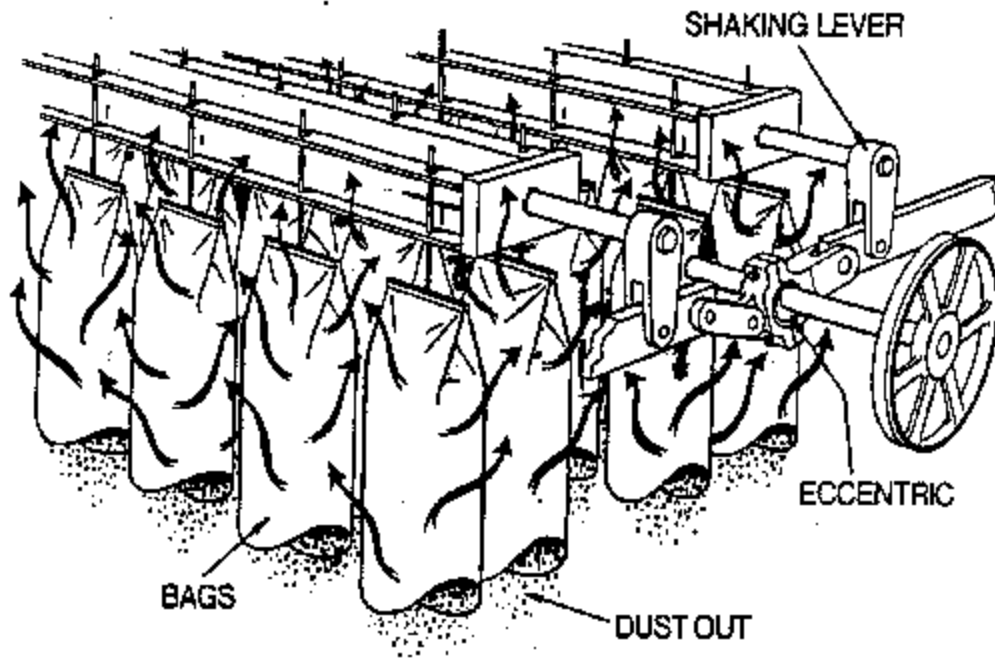


Figure 5.3-3. Cutaway View of a Typical Shaker Fabric Filter (from Reference 1).

Figura 5.3-3. Vista de Corte de un Filtro de Tela con Agitador Típico (de la Referencia 1).
Traducción de los títulos de la figura 5-3.5



5.3-4. Typical Shaker Mechanism (from Reference 2).

<i>Shaker mechanism</i> / Mecanismo de Agitación	<i>Outlet Pipe</i> / Tubo de Salida	<i>Cell plate</i> / Placa de celda
<i>Clean Air Side</i> / Lado del Aire Limpio	<i>Inlet Pipe</i> / Tubo de Entrada	<i>Hopper</i> / Tolva
<i>Dusty Air Side</i> / Lado del Aire Polvoriento	<i>Baffle plate</i> / Placa de baffle	<i>Filter bags</i> / Bolsas de Filtro

Figura 5.3-4. Mecanismo de Agitación Típico (de la Referencia 2).

Traducción de términos de la figura 5-3.4

<i>Shaking Lever</i> / Palanca de Agitación	<i>Eccentric</i> / Excéntrico
<i>Bags</i> / Bolsas	<i>Dust Out</i> / Polvo de Salida

degradación por agitación.² La mayoría de las otras telas para filtro son menos quebradizas que el vidrio y tienen vidas de servicio más largas en aplicaciones de limpieza por agitación. El mecanismo de agitación en sí también debe ser bien diseñado y mantenido o se desgastará y perderá efectividad. A medida que el mecanismo de agitación pierde efectividad, el operador con frecuencia aumentará la intensidad de la agitación con el objeto de limpiar las bolsas satisfactoriamente. La continuación de esta práctica puede destruir el mecanismo de agitación eventualmente.²

5.3.2.2 Filtro de Tela Limpiado por Aire Invertido

El lavado por aire invertido es otro método popular de limpieza de filtros de tela que ha sido utilizado extensivamente y mejorado a través de los años.⁵ Es un mecanismo de limpieza más suave pero a veces menos efectivo que la agitación mecánica.¹ La mayoría de los filtros de tela con aire invertido operan de una manera parecida a los filtros de tela limpiados por agitación. Las bolsas están abiertas en el fondo, cerradas en la parte superior y el gas fluye desde el interior hacia el exterior de las bolsas mientras el polvo es capturado en el interior. Sin embargo, algunos diseños de aire invertido recolectan polvo sobre el exterior de las bolsas. En cualquiera de estos diseños, el lavado por aire invertido se realiza forzando aire limpio a través de los filtros en la dirección opuesta al flujo de gas polvoriento. El cambio en dirección del flujo de gas causa que la bolsa se pliegue y rompa la pasta del filtro. En la recolección de las pastas interiores, se permite que las bolsas se plieguen hasta cierto punto durante la limpieza por aire invertido. Por lo general se evita que las bolsas se desplomen por completo mediante algún tipo de soporte, tal como anillos cosidos dentro de las bolsas. El soporte permite que la pasta de polvo se desprenda de las bolsas y caiga dentro de la tolva. El desprendimiento de la pasta también es auxiliado por el flujo invertido del gas. Debido a que las telas afelpadas retienen el polvo mejor que las telas tejidas y por lo tanto, son más difíciles de limpiar, las felpas por lo general no son usadas en los sistemas de aire invertido.²

Existen varios métodos de revertir el flujo a través de los filtros. Tal como con los filtros de tela limpiados con agitador, la estrategia más común es colocar compartimientos dentro del filtro de tela de manera que cada compartimiento pueda ser aislado y limpiado por separado mientras que los otros compartimientos continúan a tratar el gas polvoriento. Un diseño típico de un compartimiento de un filtro de tela limpiado por aire invertido se muestra en la figura 5.3-5.² Un método para proporcionar el aire de flujo invertido es mediante el uso de un ventilador secundario o de gas limpio proveniente de los otros compartimientos. Un segundo método es un mecanismo de aire errante. Un ejemplo de tal mecanismo se muestra en la figura 5.3-6.³ En este diseño, el polvo se recolecta sobre el exterior de las bolsas. Las salidas múltiples de aire giran alrededor del filtro de tela y proporcionan aire invertido a cada bolsa, permitiendo que la mayoría de las bolsas operen mientras unas cuantas bolsas están siendo lavadas.

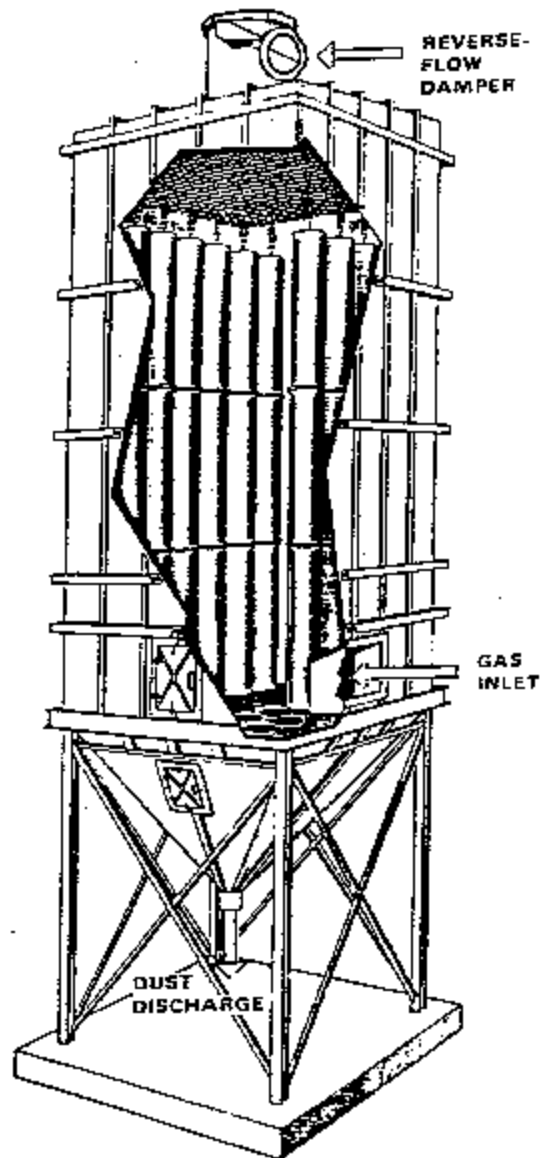


Figure 5.3-5. Typical Design of One Compartment of a Reverse-air Cleaning Fabric Filter (from Reference 2).

Figura 5.3-5. Diseño Típico de un Compartimiento de un Filtro de Tela Limpiado por Aire invertido (de la Referencia 2).

Traducción de términos de la figura 5-3.5

<i>Reverse-Flow Damper</i> / Rejilla de Flujo Invertido	<i>Gas Inlet</i> / Entrada del Gas
<i>Dust Discharge</i> / Descarga del Polvo	

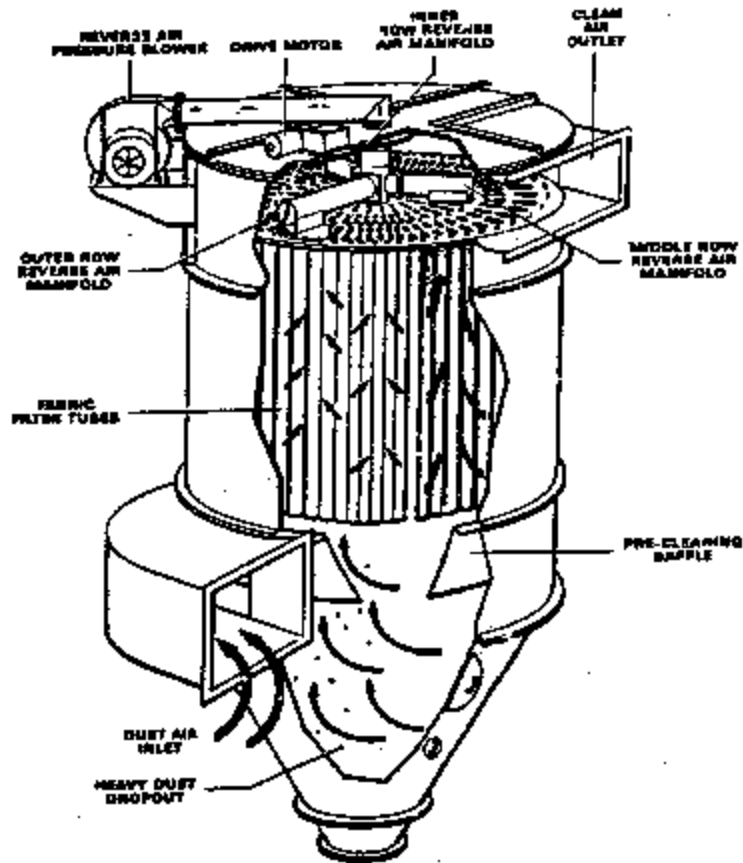


Figure 5.3-6. Reverse-Air Fabric filter with Travelling Mechanism and External Cake Collection (from Reference 3).

Figura 5.3-6. Filtro de Tela de Aire invertido con Mecanismo Errante y Recolección Externa de la pasta (de la Referencia 3).

Traducción de los títulos de la figura 5-3.6

Reverse Air Pressure Blower = Soplador de Aire invertido a Presión	Fabric Filter Tubes = Tubos del Filtro de Tela
Inner Row Reverse Air Manifold = Manifold de Aire invertido de Fila Interior	Heavy Dust Dropout = Caída del Polvo Pesado
Outer Row Reverse Air Manifold = Manifold de Aire invertido de Fila Exterior	Drive Motor = Motor Accionador
Middle Row Reverse Air Manifold = Manifold de Aire invertido de Fila en Medio	
Clean Air Outlet = Salida del Aire Limpio	
Dust Air Inlet = Entrada del Aire Polvoriento	
Pre-Cleaning Baffle = Rejilla para Pre-Limpieza	

La limpieza por aire invertido por sí sola se usa sólo en casos en donde el polvo se libera de la tela fácilmente. En muchos casos, el aire invertido se usa en conjunto con la agitación o la pulsación. Un descubrimiento relativamente reciente ha sido el uso de trombas sónicas para facilitar la limpieza (véase la sección 5.3.2.4). Durante la limpieza, las explosiones sónicas provenientes de las trombas montadas en el filtro de tela ayudan a la remoción del polvo de las bolsas. Esta es una mejora importante en la filtración.^{6,7} La asistencia sónica es un método muy popular para los filtros de tela en plantas de servicios públicos alimentadas por carbón.¹

5.3.2.3 Filtro de Tela Limpiado por Chorro Pulsante

La limpieza de los filtros de tela por medio del pulsorreactor es relativamente nueva en comparación a otros tipos de filtros de tela, ya que sólo han sido usados durante los últimos 30 años. Este método de limpieza ha ido ganando en popularidad consistentemente porque puede tratar cargas altas de polvo, operar a una caída de presión constante, y ocupar menos espacio que otros tipos de filtros de tela.⁸ Los filtros de tela limpiados por pulsorreactor sólo pueden operar como dispositivos externos de recolección de pastas. Un esquema de un filtro de tela limpiado por pulsorreactor se muestra en la figura 5.3-7.¹ Las bolsas son cerradas en el fondo, abiertas en la parte superior, y soportadas por retenes interiores llamados jaulas. El gas cargado de partículas fluye hacia dentro de la bolsa con el uso frecuente de difusores para prevenir que las partículas de tamaño extraordinario dañen las bolsas. El gas fluye desde el exterior hacia el interior de las bolsas, y después hacia afuera por el escape de gas. Las partículas son recolectadas sobre el exterior de las bolsas y caen dentro de una tolva debajo del filtro de tela.

Durante la limpieza por propulsión se inyecta un torrente corto (de 0.03 a 0.1 segundos) de aire a alta presión (90 -100 libras por pulgada cuadrada de gas, *psig*) dentro de las bolsas. El pulso es soplado a través de una boquilla tipo Venturi en la parte superior de las bolsas y establece una onda de shock que continúa adelante y hacia el fondo de la bolsa. La onda flexiona la tela, alejándola de la jaula, y enseguida la devuelve con fuerza desprendiendo la pasta de polvo. El ciclo limpiador es regulado por un cronómetro remoto conectado a una válvula solenoide. El torrente de aire es controlado por la válvula solenoide y es liberado hacia los tubos de soplado que tienen boquillas localizadas sobre las bolsas. Las bolsas generalmente son limpiadas fila por fila.

Existen varios atributos únicos a la limpieza por pulsorreactor. Debido a que el pulso limpiador es muy breve, el flujo de gas polvoriento no tiene que ser interrumpido durante la limpieza. Las otras bolsas continúan a filtrar, asumiendo trabajo extra debido a las bolsas que están siendo limpiadas.⁹ En general, no hay cambio en la caída de presión o rendimiento del filtro de tela como resultado de la limpieza por pulsorreactor. Esto permite que los filtros de tela con pulsorreactor operen en base continua con las válvulas solenoides como las únicas partes móviles significantes.² La limpieza por pulsorreactor también es más intensa y ocurre con mayor frecuencia que los otros métodos de limpieza de filtros de tela. Esta limpieza intensa desprende casi toda la pasta de polvo cada vez que la bolsa es pulsada.

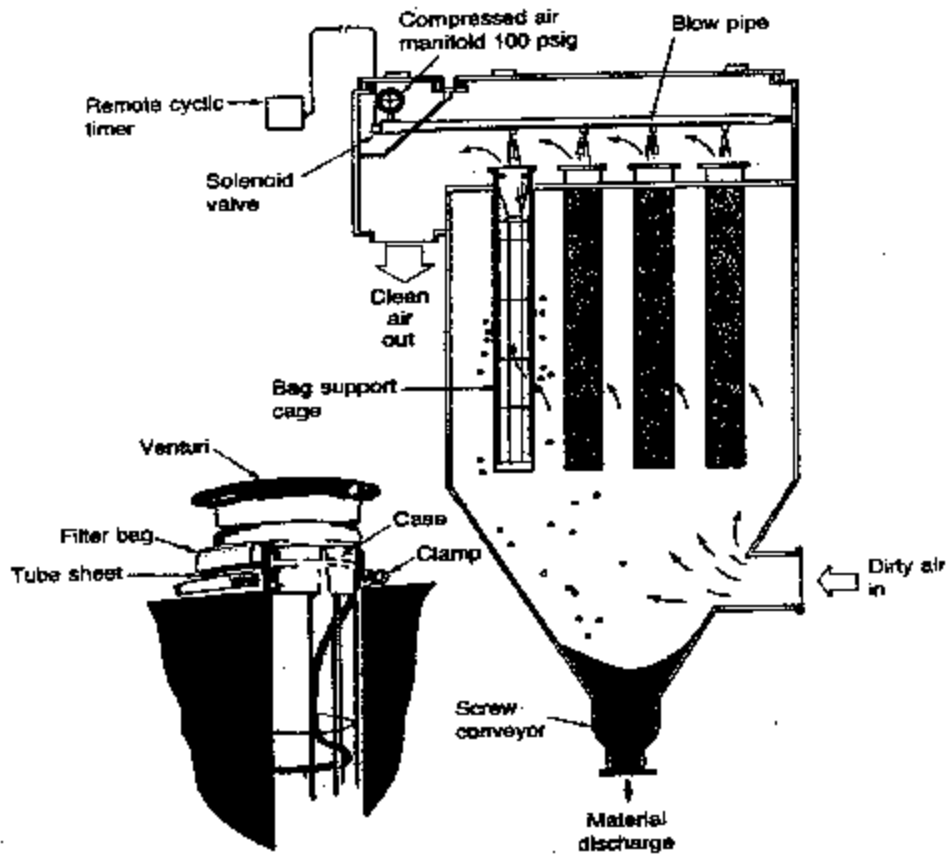


Figure 5.3-7. Schematic of a Pulse-Jet Fabric Filter with Enlarged View of Pulse Inlet Area (Reference 1).

Figura 5.3-7. Esquema de un Filtro de Tela de Pulsorreactor con Perspectiva Aumentada de la Superficie de Entrada de Pulso (Referencia 1)

Traducción de Términos de la Fig 5.3

<i>Remote cyclic timer</i> / Cronómetro cíclico remoto	<i>Dirty air in</i> / Aire contaminado de entrada
<i>Clean air out</i> / Aire limpio de salida	<i>Screw conveyor</i> / Transportador de tornillo
<i>Bag support cage</i> / Jaula para soporte de las bolsas	<i>Solenoid valve</i> / Válvula solenoide
<i>Filter bag</i> / Bolsa de filtro	<i>Tube sheet</i> / Lámina de tubo
<i>Case</i> / Caja	<i>Material discharge</i> / Descarga de material
<i>Compresses air manifold</i> / salidas múltiples de aire comprimido	<i>Clamp</i> / Pinza de material

Como resultado, los filtros de tela con pulsorreactor no dependen de una pasta de polvo para proporcionar la filtración. Las telas afelpadas son usadas en los filtros de tela de pulsorreactor porque no requieren una pasta de polvo para lograr altas eficiencias de recolección. Se ha descubierto que las telas tejidas usadas con los filtros de tela de pulsorreactor dejan pasar una gran cantidad de polvo después de ser limpiados. Traducción de los títulos de la figura 5-3.7

Puesto que las bolsas limpiadas por pulsorreactor no necesitan ser aisladas para su limpieza, los filtros de tela por pulsorreactor no necesitan compartimientos adicionales para mantener una filtración adecuada durante la limpieza. Además, debido a la naturaleza intensa y frecuente de la limpieza, pueden tratar velocidades de flujo de gas más altas con una mayor carga de partículas. En consecuencia, los filtros de tela limpiados por pulsorreactor pueden ser más pequeños que otros tipos de filtros de tela en el tratamiento de la misma cantidad de gas y polvo, permitiendo que se puedan alcanzar las relaciones más altas de gas a tela.

Una desventaja de las unidades de pulsorreactor que usan velocidades de gas muy altas es que el polvo proveniente de las bolsas limpiadas puede ser conducido inmediatamente a las otras bolsas.² Si ésto ocurre, sólo un poco del polvo cae dentro de la tolva y las capas de polvo sobre las bolsas se vuelven demasiado gruesas. Para prevenir ésto, los filtros de tela de pulsorreactor pueden ser diseñados con compartimientos separados que pueden ser aislados para su limpieza.

5.3.2.4 Otros Diseños de Filtros de Tela

Los diseños de filtros de tela menos comunes de limpieza por; propulsión reversa, vibración y sónica, y los filtros de cartucho se describen brevemente a continuación.

Limpieza por Propulsión Reversa:² Los filtros de tela de propulsión reversa tienen recolección interna de la pasta y emplean telas afelpadas. Cada bolsa es limpiada por un anillo de chorro a propulsión que viaja hacia arriba y abajo del exterior de la bolsa en un carrete. Los anillos soplan un pequeño chorro de aire a presión moderada a través de la felpa, desprendiendo el polvo sobre el interior de las bolsas. Los diseños de propulsión reversa so usados por lo general cuando se requiere una recolección con alta eficiencia para partículas finas a cargas bajas de polvo, tales como los polvos tóxicos o valiosos. Este mecanismo de método de limpieza de filtros de tela proporciona una alta eficiencia a relaciones altas de G/T, pero su aplicación industrial parece ir descendiendo.

Limpieza por Vibración:² La limpieza por vibración es parecida a la limpieza por agitador mecánico. Sin embargo, en la limpieza por vibración, las partes superiores de las bolsas están unidas a una placa, en vez de una serie de barras agitadoras tal como en la limpieza con agitador mecánico. Para limpiar las bolsas, la placa es oscilada en una dirección horizontal a una alta frecuencia. Esto crea una rasgadura en las bolsas que desprende a la pasta del filtro. La limpieza por vibración es la más efectiva para las partículas de tamaño mediano a grande con propiedades adhesivas débiles, por lo tanto este método de limpieza se limita a aplicaciones donde no se necesita la recolección de partículas finas.

Limpieza Sónica:^{6,10} La limpieza sónica se usa por lo general para asistir a otro método de limpieza, tal como la limpieza por aire invertido. Las trombas sónicas se encuentran instaladas dentro de los compartimientos del filtro de tela compartimento, en donde las bolsas son sacudidas periódicamente con energía sónica. La frecuencia y la amplitud de la ondas sonoras pueden ser ajustadas para maximizar el efecto para un polvo determinado. El shock de la onda sonora causa que se forme una capa delimitadora en la pasta del filtro; ésto permite que más partes de la pasta se desprendan durante la limpieza, y así, mejora la eficiencia de limpieza. Más de la mitad de los filtros de tela de gas invertido también utilizan trombas sónicas, ya sea continua o intermitentemente.¹¹

Recolectores de Polvo de Cartucho.^{2,12} Los recolectores de cartucho son telas plisadas que están contenidas en contenedores completamente cerrados, o cartuchos. Estos recolectores ofrecen una filtración con alta eficiencia combinada con una reducción significativa de tamaño en la unidad de filtro de tela. Un filtro de cartucho ocupa mucho menos espacio que unas bolsas de tela con la misma cantidad de medio de filtración. Además, los recolectores de cartucho pueden operar a relaciones más altas de G/T que los filtros de tela. Los cartuchos pueden ser limpiados por pulso, y algunos tipos pueden ser lavados y utilizados de nuevo. El reemplazo del cartucho también es más sencillo que el reemplazo de la bolsa de filtro. Sin embargo, este tipo de filtro de tela se ha limitado a aplicaciones con bajas velocidades de flujo y bajas temperaturas. Los nuevos materiales para filtros y diseños de recolectores están incrementando las aplicaciones de los filtros de cartucho.

5.3.3 Características de la Tela

La selección de la tela es un aspecto muy importante de la operación del filtro de tela. Existen muchas fibras que pueden ser usadas efectivamente como filtros, con propiedades diversas que determinan sus aplicaciones apropiadas. En general, las fibras pueden ser convertidas en telas tejidas o afelpadas. El método de limpieza afecta la selección de la fibra, ya que algunas fibras se desgastan rápidamente y pierden su efectividad como resultado de la flexión o la agitación frecuentes. El tipo de tela también debe conformarse al método de limpieza, y a las características de la corriente y de las partículas. Las telas tejidas son preferidas para los filtros de tela con agitador y de aire invertido. Las telas afelpadas son recomendadas para los filtros de tela con pulsorreactor y propulsión invertida. El uso de la felpa se limita por lo general a los estilos de recolección de polvo en superficies externas.²

Las características principales de la corriente de gas a considerar cuando se seleccionan las telas son la temperatura y la composición química. La mayoría de las telas son degradadas por las temperaturas altas.² Entre la variedad de telas disponible, existe un amplio rango de temperaturas máximas de operación que pueden ser igualadas al rango de temperaturas en las diferentes aplicaciones. Algunas telas también son fácilmente degradadas por ácidos, mientras que otras son altamente resistentes a los ácidos. Los alcalíes, oxidantes y solventes son otros tipos de sustancias químicas que pueden dañar a los materiales para filtro.² Las fibras nuevas, tales como el Ryton®, el Gore-Tex® y el Chem-Pro®, están continuamente en desarrollo para aplicaciones de alta temperatura y otras aplicaciones exigentes.¹³ Las fábricas de cerámica, como por ejemplo el Nextel®, se han desarrollado recientemente y pueden funcionar a temperaturas de hasta 1000°F (538°C).^{13,14} La Tabla 5.3-2 enumera las temperaturas máximas de operación, y las resistencias físicas y químicas de varias telas de uso industrial.²

Las características importantes de las partículas a considerar en la selección de la tela son el tamaño, el potencial de abrasión, y el potencial de liberación. Los tamaños promedio de las partículas pueden ser un factor en la selección del tipo de tejido o felpa que se seleccione para una aplicación particular. Con polvos muy abrasivos, se debe tomar la precaución de asegurarse que la tela no se desgastará demasiado rápido. Los polvos húmedos o pegajosos requieren una tela que liberará la pasta de polvo con facilidad, o que esté recubierta con algún tipo de capa lubricante.²

Se han desarrollado varios acabados y texturas diferentes para las telas de fibra de vidrio para aumentar su uso en la filtración. También existen muchos recubrimientos y tratamientos químicos disponibles para proporcionar lubricación y otras propiedades a las fibras y de este modo mejorar su rendimiento.

5.3.4 Eficiencia de Recolección

Los filtros de tela bien diseñados y mantenidos que son operados correctamente deben recolectar por encima del 99 por ciento de las partículas que varían en tamaño desde sub-micras a cientos de sub-micras.¹ Hay varios factores que pueden afectar la eficiencia de recolección de los filtros de tela. Estos factores incluyen la velocidad de filtración del gas, las características de la tela, y el mecanismo de limpieza. En general, la eficiencia de recolección aumenta con el aumento de la velocidad de filtración y del tamaño de las partículas. Otras características de las partículas, tanto como el tipo de método de limpieza, son variables claves en el diseño de un filtro de tela. Un filtro de tela diseñado incorrectamente no funcionará tan bien como es posible y con cierta frecuencia impactará la eficiencia.

Para una determinada combinación de diseño de filtro y de polvo, la concentración efluente de partículas proveniente de un filtro de tela es casi constante mientras que la eficiencia en total de un filtro de tela varía con mayor probabilidad de acuerdo a la carga del particulado.² Por esta razón, los filtros de tela pueden ser considerados como dispositivos de salida constante que como dispositivos de eficiencia constante. La concentración constante de efluente se logra porque a cualquier tiempo determinado una parte del filtro de tela está siendo limpiado. A diferencia de los ciclones, los absorbedores, y los precipitadores electrostáticos, los filtros de tela nunca alcanzan verdaderamente un estado de equilibrio en la recolección de partículas.² Como resultado de los mecanismos de limpieza usados en los filtros de tela, la

Tabla 5.3-2. Intervalos de Temperatura, y Resistencias Físicas y Químicas de Telas Industriales Comunes (de las Referencias 2 and 14)

Tipo de Tela	Temperature Máxima de Operación (°F)	Resistencia Física					Chemical Resistance				
		Calor Seco	Calor Húmedo	Abrasión	Agitación	Flexión	Acidos Minerales	Acidos Orgánico	Alcalifes	Oxidadore	Solvente
Algodón	180	B	B	S	B	B	P	B	S	S	E
Dacron	275	B	S	B	E	E	B	B	S	B	E
Orlon	275	B	B	B	B	E	B	B	S	B	E
Nylon	225	B	B	E	E	E	P	S	B	S	E
Dynel	160	S	S	S	S-P	B	B	B	B	B	B
Polipropileno	200	B	S	E	E	B	E	E	E	B	B
Creslan	275	B	B	B	B	E	B	B	S	B	E
Vycron	300	B	S	B	E	E	B	B	B	B	E
Nomex®	400	E	E	E	E	E	S-P	E	B	B	E
TeSlon®	450	E	E	S-P	B	B	E	E	E	E	E
Nextel™	1000	E	E	ND	ND	ND	E	E	E	E	E
LaND	215	S	S	B	S	B	S	S	P	P	S
Vidrio	550	E	E	P	P	S	E	E	B	E	E

Note: E = Excelente, B = Bueno, S = Satisfactorio, P = Pobre, ND = No Disponible.

eficiencia de recolección a un tiempo determinado siempre está cambiando. Cada ciclo de limpieza remueve al menos algo de la pasta del filtro y afloja las partículas que permanecen sobre el filtro. Cuando la filtración continúa, la capacidad de filtrado ha sido reducida debido a la pasta de filtro perdida y las partículas sueltas son empujadas a través del filtro por el flujo de un gas. Esto reduce la eficiencia de recolección. A medida que las partículas son capturadas la eficiencia aumenta hasta el siguiente ciclo de limpieza. Las eficiencias promedio para los filtros de tela son generalmente determinadas por pruebas que cubren un número de ciclos de limpieza a una carga de entrada constante.²

Con anterioridad, la figura 5.3-2 mostró una curva típica de recolección fraccional contra el tamaño de las partículas para los filtros de tela. La figura 5.3-8 muestra las curvas de eficiencia de recolección para los filtros de tela que operan en las industrias de servicios públicos, ferro aleaciones, y hierro y acero, respectivamente, que fueron calculadas a partir de los datos de pruebas reportados.¹⁵ Los datos de eficiencia de recolección para la MP₁₀ y la MP_{2.5} se proporcionan en la Tabla 5.3-3.

5.3.5 Aplicabilidad

Los filtros de tela pueden funcionar muy efectivamente en muchas aplicaciones diferentes. La variedad de los diseños y telas permite la adaptabilidad a la mayoría de las situaciones. Para la mayoría de las aplicaciones, existen varias combinaciones de método de limpieza y filtro de tela que son apropiadas. La Tabla 5.3-4 enumera las aplicaciones comunes de los filtro de tela y sus métodos de limpieza y telas recomendados. La Tabla 5.3-1 anterior proporcionó las relaciones recomendadas de G/T para diversas aplicaciones de filtros de tela. También existen métodos empíricos para determinar las relaciones G/T para una aplicación determinada, los cuales se describen en el capítulo 5 del Manual de Costos de la OAQPS, *OAQPS Cost Manual*.

Aunque los filtros de tela pueden ser usados en muchas condiciones diversas, hay algunos factores que limitan sus aplicaciones. Las características del polvo son un factor. Algunas partículas son demasiado adhesivas para los filtros de tela. Mientras tales partículas son recolectadas fácilmente, son demasiado difíciles de remover de las bolsas. Las partículas provenientes de la combustión de aceite son un ejemplo de un polvo muy pegajoso, la mayoría del cual se cree que sean hidrocarburos pesados. Por esta razón, los filtros de tela no son recomendados para calderas que queman aceite exclusivamente;⁴ si embargo, los filtros de tela son usados con frecuencia con calderas que queman aceite como combustible secundario.

El potencial de explosión también es una preocupación para ciertas aplicaciones de filtros de tela. Algunas telas son inflamables, y algunos componentes de los polvos y la corriente podrían formar mezclas explosivas. Si un filtro de tela se selecciona para controlar mezclas explosivas, se debe cuidar de diseñar y operar los filtros de tela de manera que se eliminen las condiciones que podrían incendiar el polvo, la corriente y las bolsas. Además, los filtros de tela deben ser diseñados para prevenir lesiones a operadores en caso de explosión.

Traducción de términos de la Figure 5.3-8

CALDERAS ACCIONADAS POR CARBON

Symbols --, -- --€-- --->--

PRODUCCION DE HIERRO Y ACERO

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)

v.s Tamaño de las Partículas (μm)

v.s Tamaño de las Partículas (μm)

	--€--	Extendedor, Bituminoso, Calidad de Datos: C		-€--	Hierro y Acero, Calidad de Datos: D,E	Desulfurización
Inserte Grafica			Inserte Grafica	---	Hierro Gris, Cúpulas Calidad de Datos: C, E	
		-, - Extendedor, Antracita, Calidad de Datos D				

HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO PARA FERROALEACIONES

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)
v.sTamaño de las Partículas (μm)

	--€--	80%Fe Mn Calidad de Datos: D
Inserte Grafica		
	--,	50% FeSi Calidad de Datos:B
	---	Metal Si Calidad de Datos: B

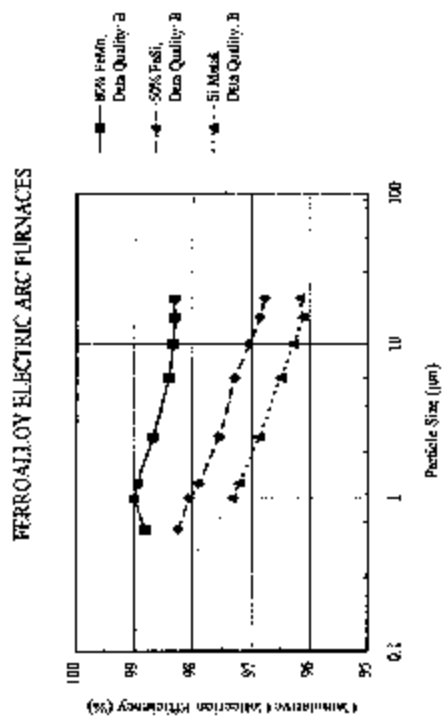
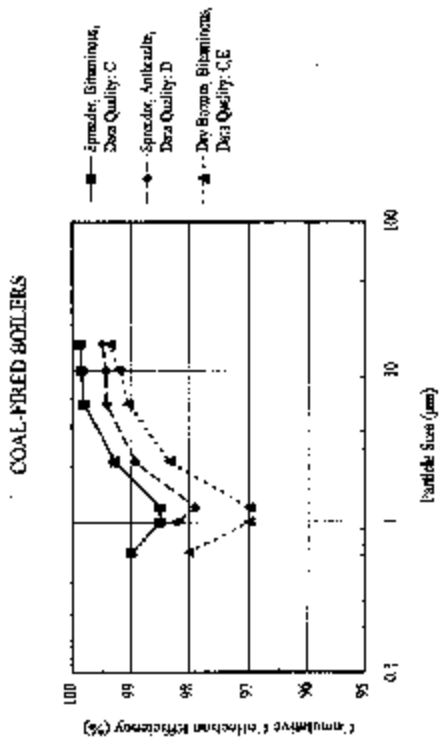
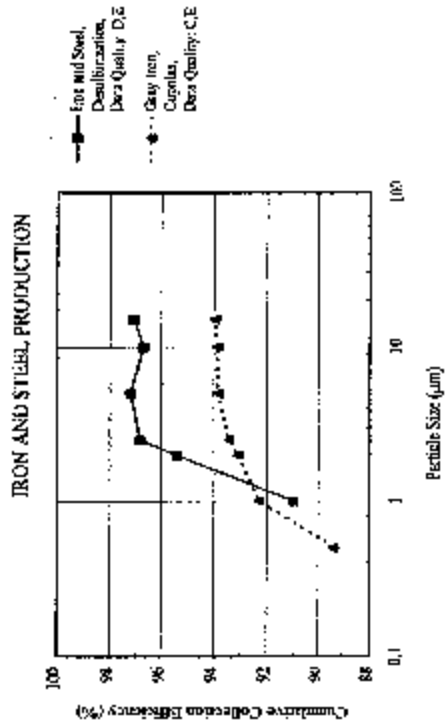
Nota:1. La calidad de datos se refiere a la clasificaciones asignadas a los factores de emisión a partir de los cuales se calcularon las eficiencias (de la Referencia 8):

A = excelente, B = Arriba del promedio, C = promedio, D = debajo del promedio, E = pobre

Nota 2. Cordine esta traducción con la pagina siguiente.

Figura 5.3-8.

Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para Filtros de Tela en Combustores de Carbón, Hornos de Arco Eléctrico para Ferroaleaciones, y Operaciones de Producción de Hierro y Acero (Referencia 15).



Note: Data quality refers to the data quality ratings assigned to the emission factors from which the efficiencies were calculated (from Reference 8).

- A = excellent
- B = above average
- C = average
- D = below average
- E = poor

Figure 5.3-8. Cumulative Collection Efficiency Data for Fabric Filters at Coal Combustors, Ferroalloy Electric Arc Furnaces, and Iron and Steel Production Operations (from Reference 15).

La temperatura y la humedad también son factores limitantes en el uso de los filtros de tela. En la actualidad, existen pocos filtros de tela en aplicaciones en donde las temperaturas exceden los 500°F (260°C) durante largos períodos de tiempo. Sin embargo, las nuevas fibras que pueden operar a temperaturas en el rango de 900 a 1000°F (482 a 538°C) están disponibles comercialmente y en uso en algunas instalaciones. Un ejemplo de tales telas es la tela cerámica Nextel®. Esta tela es muy efectiva, pero también es muy costosa y tiene el precio mucho más alto que el Teflon®, telas para filtro usadas comúnmente.¹³ El alto costo de las nuevas telas para filtros podría desalentar el uso de los filtros de tela en aplicaciones con temperaturas muy altas. La humedad también puede ser un problema al considerar los filtros de tela. Las partículas húmedas pueden ser difíciles de limpiar de las bolsas y pueden ligar y obstaculizar la tolva.¹ Las corrientes con alta humedad también pueden requerir casas de bolsas con aislamiento para mantener temperaturas bien por encima del punto de rocío para prevenir la condensación.

5.3.6 Costos de los Filtros de Tela

Los costos de instalar y operar un filtro de tela incluyen los costos capitales y anuales. Los costos capitales incluyen todos los costos iniciales de filtro de tela relacionados con el

Tabla 5.3-4. Métodos de Limpieza y Telas Típicas para las Aplicaciones Industriales de los Filtros de Tela (de la Referencia 2)

Aplicación	Código de Categoría de la Fuente	Métodos Típicos de Limpieza ^a	Telas Típicas ^b
Calderas de Plantas para Servicios Públicos (Carbón)	1-01-002...003	AM, PP, AR with AS	Fibra de vidrio, Teflón, Vidrio Tratado con Teflón
Calderas Industriales (Carbón, Madera)	1-02-001...003 1-02-009	PP, AR	Fibra de vidrio, Teflón, Vidrio Tratado con Teflón
Calderas Comerciales/ Institucionales (Carbón, Madera)	1-03-001...003 1-03-009	PP, AR	Fibra de vidrio, Teflón, Vidrio Tratado con Teflón
Procesamiento de Metales No-Ferrosos (Primario y Secundario)			
Cobre	3-03-005 3-04-002	AM, AR	Fibra de vidrio, Dacrón, Polipropileno, Nomex, Teflón
Plomo	3-03-010 3-04-004	AM, AR	Polipropileno, Nomex, Teflón, Dacrón, Orlón
Zinc	3-03-030 3-04-008	AM, AR	Polipropileno, Nomex, Teflón, Dacrón
Aluminio	3-03-000...002 3-04-001	AM, AR	Nomex, Dacrón, Teflón, Polipropileno

Table 5.3-4 Cont.

Aplicación	Código de Categoría de la Fuente	Métodos Típicos de Limpieza ^a	Telas Típicas ^b
Otro	3-03-011...014 3-04-005...006 3-04-010...022	AM, AR	Nomex, Dacrón, Teflón, Polipropileno
Procesamiento de Materiales Ferrosos			
Coque	3-03-003...004	AM, AR	Combinación de Dacrón, Teflón
Ferroaleación	3-03-006...007	AR, AM	FibAR de vidrio (recubierta con grafito, silicón, teflón), Dacrón, Nomex
Hierro y Acero	3-03-008...009	AR, AM, PP	Fibra de vidrio con lubricante (silicón, grafito, Teflón)
Fundiciones de Hierro Gris	3-04-003	AM, AR	Fibra de vidrio (con silicón), Nomex, Orlón
Fundiciones de Acero	3-04-007 3-04-009	AR, AM, PP	Fibra de vidrio, Nomex, Dacrón, Teflón
Productos Minerales			
Cemento	3-05-006...007	AM, PP, AR	Dacrón, Algodón, Lana, Nomex, Fibra de Vidrio
Lavado de Carbón	3-05-010		
Quarrying y ProceASmiento de Piedra	3-05-020	AM, PP, AR	Algodón, Orlón, Dacrón
Otro	3-05-003...999 (excepto lo anterior)	AM, PP, AR	Fibra de vidrio, Nomex, Teflón, Orlón, Nylon, Dacrón, Dynel, Algodón
Manufactura de Asfalto	3-05-001...002	PP, AR, AM	Nomex, Fibra de vidrio
Molienda de Grano y Alimento		PP, AR	Dacrón

^a AM = Agitación Mecánica, RA = Aire invertido, PJ = Pulsorreactor, SA = Asistencia Sónica

^b No se especifica si las telas son tejidas o afelpadas. Las telas afelpadas por lo general se recomiendan para la limpieza por pulsorreactor; las telas tejidas generalmente son utilizadas para la limpieza por aire invertido y por agitación mecánica.

Tabla 5.3-5. Factores del Costo de Capital para los Filtros de Tela (de la Referencia 16)

Artículo de Costo	Factor
Costos Directos	
Costos del Equipo Adquirido	
Filtro de Tela + bolsas + equipo auxiliar	Tal como se estima (A)
Instrumentación	0.10 A
Impuestos sobre a venta	0.03 A
Transporte	<u>0.05 A</u>
Costo total del equipo dquirido (CEA)	B = 1.18 A
Costos de Instalación Directos	
Cimientos y Soportes	0.04 B
Manejo y erección	0.50 B
Sistema eléctrico	0.08 B
Tubería	0.01 B
Insulación para el sistema de ductos	0.07 B
Pintura	<u>0.02 B</u>
Costo de instalación directo total	0.72 B
Preparación del Sitio y de los Edificios	Tal como se requiere (Sitio)
Costos de Instalación Directos Totales (CD)	1.72 B + Sitio
Costos Indirectos (instalación)	
Ingeniería	0.10 B
Gastos de construcción y de campo	0.20 B
Honorarios del contratista	0.10 B
Inicio de Obra	0.01 B
Prueba de Rendimiento	0.01 B
Contingencias	<u>0.03 B</u>
Costos Indirectos Totales (CI)	0.45 B
Total Capital Investment = DC + IC	2.17 B + Site

equipo. Los costos anuales son los costos directos de operar y mantener el filtro de tela por un año, más costos directos tales como los gasto por mantenimiento; la recuperación del capital; los impuestos, la aseguranza y los cargos administrativos. Las secciones a continuación discuten los costos de capital y anuales para diversos diseños de filtros de tela. Los costos de capital han sido referenciados al tercer trimestre de 1995. La consideración principal de diseño, respecto al costo, es la relación G/T (G/T). La relación G/T depende de varios factores y debe ser optimizada para balancear los costos de capital, en función de los tamaños de filtros de tela, y los costos de operación anuales, en particular la caída de presión.¹

5.3.6.1 Costos de Capital

La inversión capital total (ICT) para los filtros de tela incluyen todos los costos iniciales de capital del filtro de tela, tanto directos como indirectos. Los costos directos de capital son los costos del equipo adquirido (CEA) y los costos por instalar el equipo físicamente (cimientos y soportes, alambrado eléctrico, tubería, etc.) Los costos indirectos de capital también están relacionados a la instalación e incluyen la ingeniería, los honorarios del contratista, el inicio de la obra, las pruebas, y las contingencias. El CEA depende de las especificaciones de diseño del filtro de tela; los costos directos e indirectos de instalación por lo general se calculan como factores del CEA.¹⁶ Los factores usados comúnmente para estimar los costos de capital del filtro de tela se proporcionan en la tabla 5.3-5.

Existen varios factores de diseño que influyen el CEA del filtro de tela, y a su vez la ICT de los filtros de tela. Los factores importantes incluyen la velocidad de flujo del gas de entrada, el mecanismo de limpieza, el tipo de polvo, la carga de polvo, las características del polvo, la carga de polvo, las características del polvo, las características de la corriente de gas, y el tipo de tela. Refiérase al capítulo 5 del Manual de Control de Costos de la OAQPS, *OAQPS Control Cost Manual*, para las ecuaciones de costo.¹⁶

Velocidad de Flujo del Gas: El flujo de entrada tiene el mayor impacto sobre los costos de un filtro de tela, puesto que afecta el tamaño necesario del filtro de tela. Para cualquiera de los tipos de limpieza de filtros de tela, a medida que la velocidad de flujo del gas aumenta también aumenta el tamaño del filtro de tela y, en consecuencia, los costos. Los filtros de tela típicamente tratan velocidades de flujo desde 10 000 hasta por encima de 1 000 000 *acfm*.² Aunque los costos de los filtros de tela aumentan de manera aproximadamente lineal con la velocidad de flujo del gas, la pendiente de la curva de costo depende de los otros aspectos de diseño que se discuten a continuación.

Mecanismo de Limpieza: El mecanismo de limpieza de los filtros de tela es el aspecto de diseño que sigue al más importante en términos de costo. La figura 5.3-9 presenta las curvas de costo contra la velocidad de flujo del gas para diferentes mecanismos de limpieza de los filtros de tela con tela Nomex® fabricando corrientes similares.¹⁷ Las curvas de costo para dos diferentes tipos de filtros de tela con pulsorreactor, de caja en común y modular, se proporcionan en la figura 5.3-9, junto con información de costos para la limpieza por aire invertido y por agitación mecánica. Los filtros de tela con pulsorreactor con caja en común son filtros de tela que no se sacan fuera de línea para limpiarse. Los filtros de tela con pulsorreactor modulares están contruidos con bolsas en compartimientos separados que pueden sacarse fuera de línea para su limpieza.¹⁶ La figura 5.3-9 ilustra que los filtros de tela limpiados por agitación mecánica tienen costos de ICT más altos que los de propulsión a pulso (siendo las unidades con aire invertido los más altos), debido mayormente a las relaciones más bajas de G/T, los cuales elevan los costos de capital. En términos de los filtros de tela con limpieza por propulsión a pulso, las unidades con pulsorreactor modulares son ligeramente más costosas que las unidades con caja en común en términos de la ICT

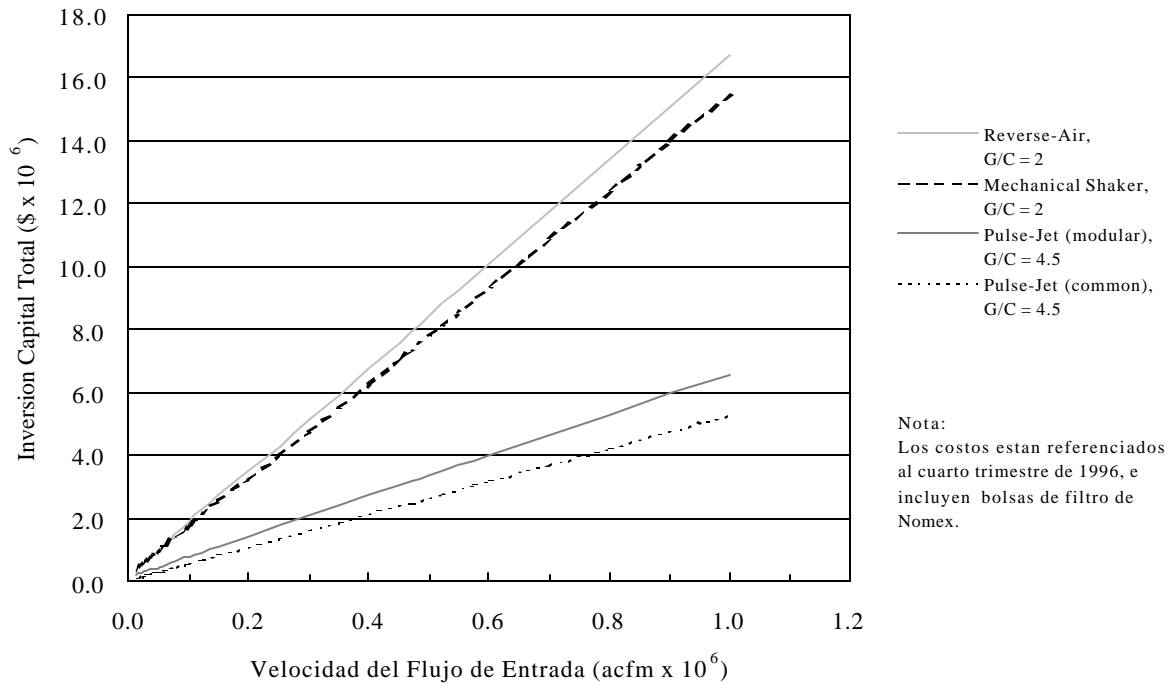


Figura 5.3-9. Efecto del Mecanismo de Limpieza sobre la ICT del Filtro de Tela (Referencia 17).

Aun cuando diferentes mecanismos de limpieza pueden operar sobre diferentes rangos de relaciones de G/T, los filtros de tela con pulsorreactor por lo general operan a relaciones de más altas de G/T en comparación a los modelos con agitador y aire invertido. Por esta razón, los filtros de tela con pulsorreactor son generalmente más pequeños (con costos de ICT más bajos) que otros diseños de filtros de tela que tratan la misma velocidad d flujo. Sin embargo, la elección del mecanismo de limpieza también afecta la elección (y los costos resultantes) de la tela noy el equipo auxiliar. Al elegir entre los mecanismos de limpieza, el CEA se calcula para todos los diseños aplicables para determinar la opción menos costosa.

Relación Gas a Tela: El tipo de polvo es lo más reponsable de la determinción de la relación correcta de G/C para un filtro de tela particular. Cada combinación de polvo y el método de limpieza del filotro de tela tiene una relación recomendada de G/T que en la

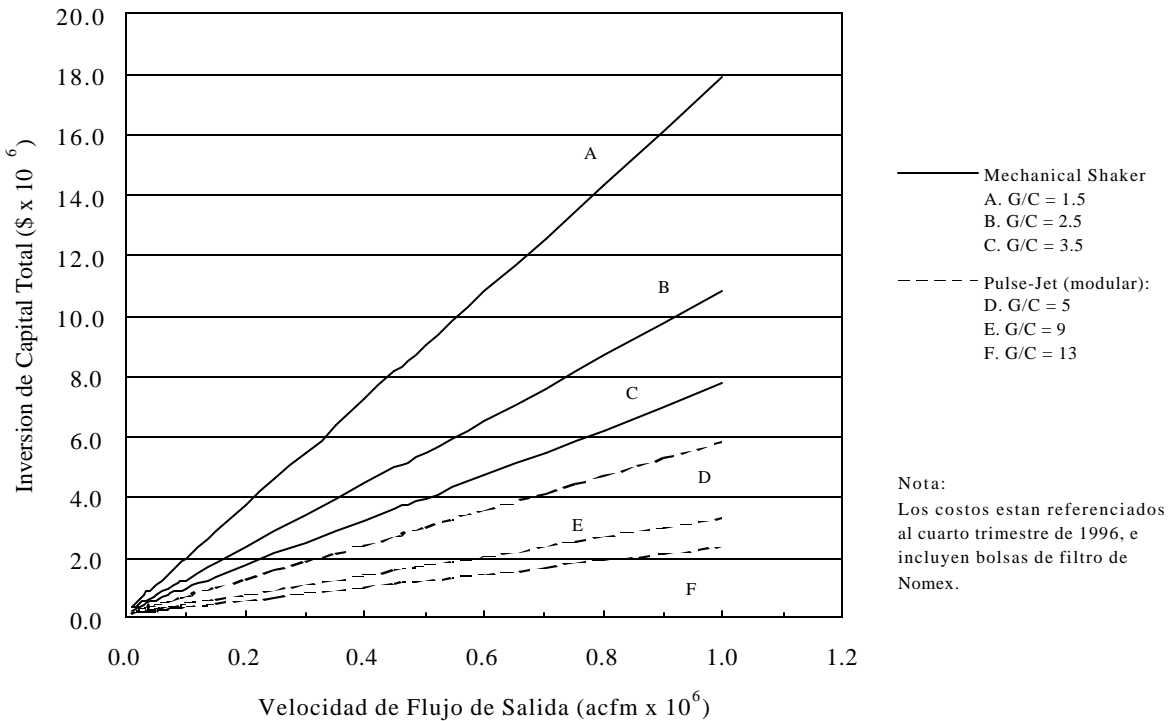


Figure 5.3-10. Efecto de la Relación Gas a Tela sobre la ICT de los Filtros de Tela (Referencia 17).

Aun cuando diferentes mecanismos de limpieza pueden operar sobre diferentes rangos de relaciones de G/T, los filtros de tela con pulsorreactor por lo general operan a relaciones de más altas de G/T en comparación a los modelos con agitador y aire invertido. Por esta razón, los filtros de tela con pulsorreactor son generalmente más pequeños (con costos de ICT más bajos) que otros diseños de filtros de tela que tratan la misma velocidad de flujo. Sin embargo, la elección del mecanismo de limpieza también afecta la elección (y los costos resultantes) de la tela y el equipo auxiliar. Al elegir entre los mecanismos de limpieza, el CEA se calcula para todos los diseños aplicables para determinar la opción menos costosa.

Relación Gas a Tela: El tipo de polvo es lo más responsable de la determinación de la relación correcta de G/C para un filtro de tela particular. Cada combinación de polvo y el método de limpieza del filtro de tela tiene una relación recomendada de G/T que en la mayoría de los casos se ha derivado a través de las operaciones reales de los filtros de tela. Para una velocidad de flujo determinada, las relaciones de G/T resultarán en filtros de tela más pequeños y costos menores de ICT. La figura 5.3-10 muestra curvas de costo típicas para los filtros de tela con agitación mecánica y con pulsorreactor operando a relaciones de G/T apropiadas para cada tipo de limpieza.¹⁷ Aunque las curvas de costo de los agitadores mecánicos por lo general son más altas que las curvas de costo del pulsorreactor (modular), un filtro de tela con limpieza por agitador mecánico y una relación alta de G/T (curva C) tiene costos de ICT similares a un filtro de tela con limpieza con pulsorreactor con una relación baja de G/T (curva D).

Carga de Polvo: La carga de polvo es una medida de la cantidad de polvo por volumen del gas siendo tratado que por lo general se expresa como el peso del polvo por unidad de volumen de gas (por ejemplo, en gramos por pie cúbico). Mientras que el tipo de polvo por lo general determina la mejor relación de G/T, la carga de polvo puede causar ajustes a la relación recomendada de G/T debe ser disminuída para que más tela esté disponible para manejar los altos niveles de polvo.¹ Con cargas bajas de polvo, la relación de G/T puede ser aumentada, lo cual a su vez reducirá el tamaño del filtro de tela.

Características de las Partículas: El tamaño y la adhesividad son características de las partículas que influenciarán el diseño y los costos de los filtros de tela. La relación de G/T debe ser disminuída para las partículas pequeñas y aumentada para las partículas grandes.¹ Las propiedades adhesivas del polvo afectarán la selección de la tela y del mecanismo de limpieza. Los mecanismos de limpieza de intensidad más alta, como el pulsorreactor, funciona mejor con partículas pegajosas, tanto como las telas con recubrimientos tales como el teflón u otros lubricantes.

Características de la Corriente de Gas: Las dos características primarias de la corriente que influencian el diseño del filtro de tela y los costos de capital son la temperatura y las propiedades químicas de la corriente de gas. Ambas características pueden tener un impacto sustancial sobre la selección de la tela, ya que las telas disponibles tienen resistencias que varían ampliamente con el calor y la degradación química (véase la tabla 5.3-2 anterior). Además, las propiedades de la corriente de gas pueden afectar la construcción del filtro. Las corrientes con temperaturas altas requieren el aislamiento de los filtros de tela. Las corrientes con componentes altamente corrosivos necesitarán un filtro de tela construido de acero inoxidable resistente a la corrosión. El aislamiento y los materiales resistentes a la corrosión pueden ser adiciones muy costosas al costo del filtro de tela, tal como se muestra en la figura 5.3-11; el uso del acero inoxidable, sin embargo, tiene un mayor impacto de costo en los filtros de tela que el aislamiento.¹⁷

Tipo de Tela: El tipo de tela generalmente se selecciona a gran medida por el tipo de método de limpieza del filtro de tela, el tipo de polvo y las características de las partículas y la corriente de gas. Mientras estos factores pueden limitar la selección, por lo general existen al menos dos telas que pueden funcionar a satisfacción en una situación determinada. Existe un amplio rango de precios entre las telas

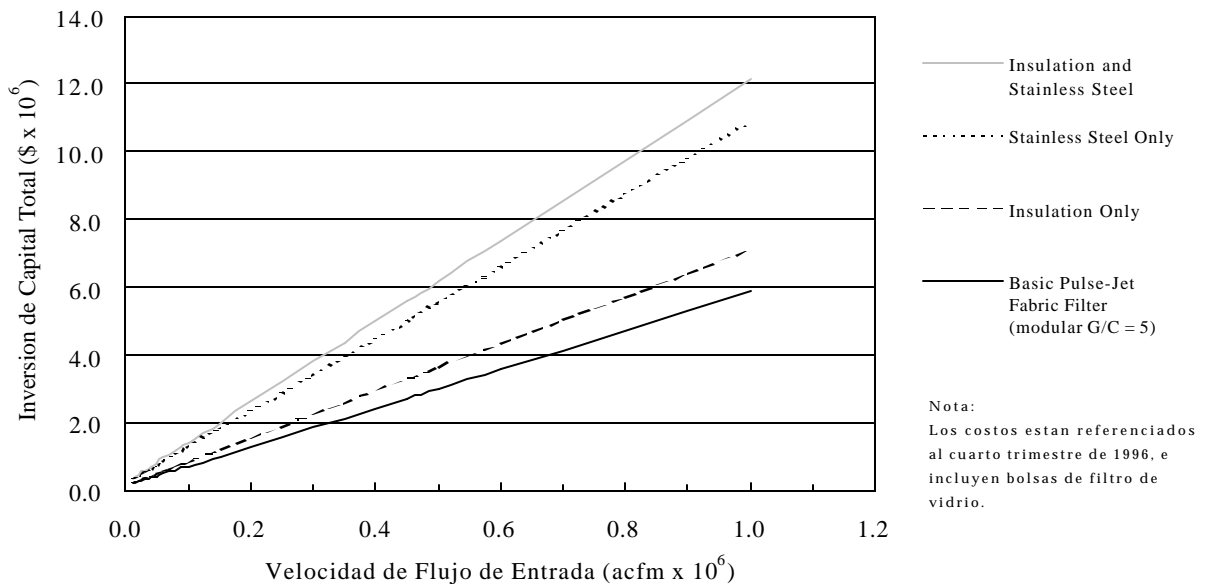


Figure 5.3-11. Efectos de la Insulación y el Acero Inoxidable sobre la ICT de los Filtros de Tela (Referencia 17).

típicas, pero no se recomienda que las telas se elijan basándose sólo en el costo. Algunas telas con precios más altos tienen vidas de operación más largas resultando en menores costos de mantenimiento y reemplazo.⁴ Las figuras 5.3-12 y 5.3-13 muestran las curvas de costo de capital para filtros de tela de aire invertido y con pulsorreactor, respectivamente, con tipos de telas típicos.¹⁷

5.3.6.2 Costos Anuales

El costo anual total de un filtro de tela consiste en costos tanto directos como indirectos. Los costos directos anuales son los asociados con la operación y el mantenimiento de los filtros de tela. Estos incluyen la mano de obra (de operación, supervisión, y mantenimiento), los materiales para la operación, las partes para reemplazo, la electricidad, el aire comprimido (para el pulsorreactor), y el desecho del polvo.

Los costos de desecho de los polvos recolectados que no poseen algún valor por re-uso pueden ser altos, comprendiendo en veces por encima del 50 por ciento de los costos anuales. Los costos anuales indirectos incluyen los impuestos, la aseguranza, los costos administrativos, los gastos de mantenimiento y los costos de recuperación del capital. Todos los costos indirectos anuales excepto los gastos de mantenimiento dependen del ICT. En la mayoría de los casos, los costos anuales son difíciles de generalizar porque dependen de muchos factores que pueden variar ampliamente, aún entre filtros de tela similares. La Tabla 5.3-6 enumera los parámetros que impactan los costos de los filtros de tela, con valores típicos provistos para cada parámetro. La Tabla 5.3-7 proporciona los factores de costo anuales para los filtros de tela. Es difícil generalizar estos costos para todos los filtros de tela, ya que los costos anuales son muy específicos del sitio.¹⁶

Los costos de electricidad son, sin embargo, una porción significativa de los costos anuales de la mayoría de los filtros de tela. Los ventiladores de los filtros de tela consumen la mayoría de la energía eléctrica; el equipo de limpieza también requiere energía. El consumo

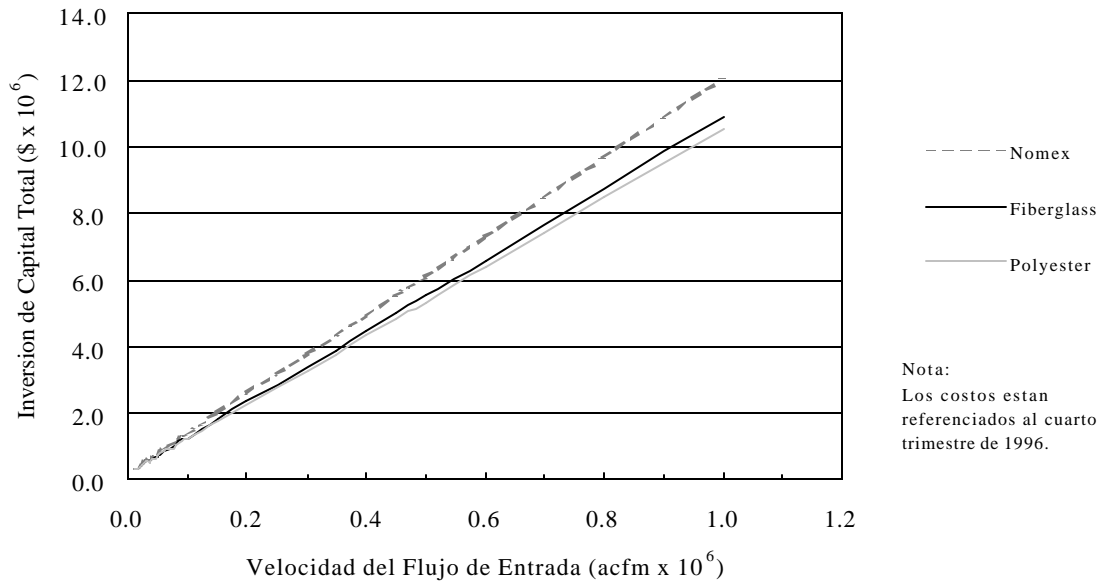


Figura 5.3-12. Efecto del Tipo de Tela sobre la ICT - Filtro de Tela de Aire Reverso, G/C=2.5 (Referencia 17).

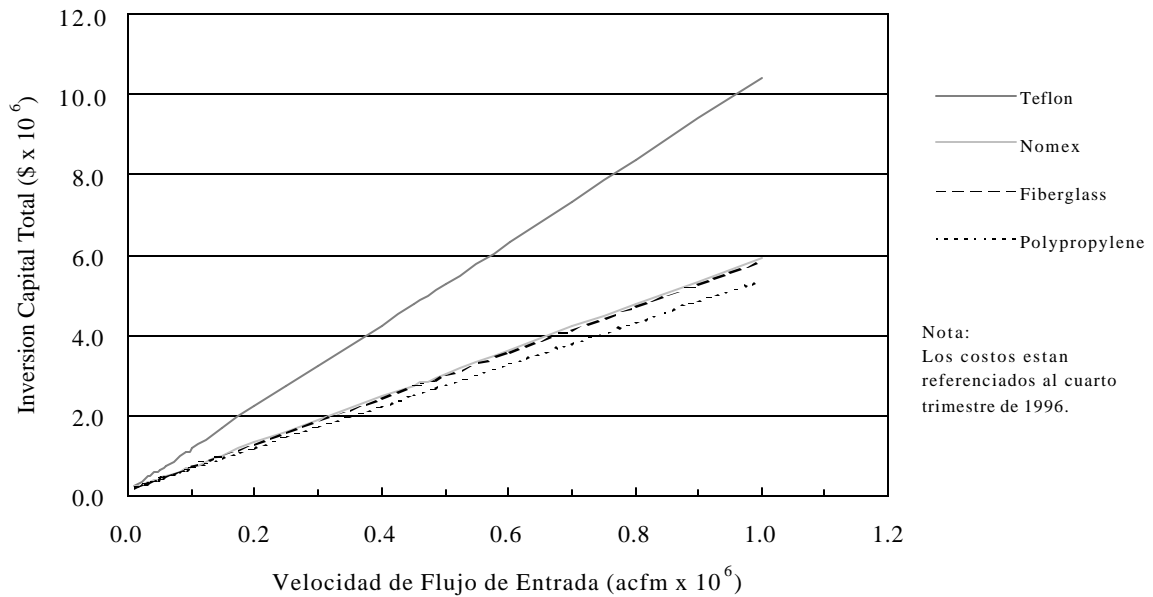


Figure 5.3-13. Efecto del Tipo de Tela sobre la ICT - Filtro de Tela de Propulsión a Pulso, G/C=5 (Referencia 17).

de energía del ventilador se relaciona directamente a la caída de presión a través de la tela, lo cual a su vez es directamente dependiente de la relación de G/T. A medida que la relación de G/T aumenta, también aumenta la caída de presión y los costos de electricidad resultantes. Como se

menciona con anterioridad, aumentar la relación de G/T disminuirá el tamaño de los filtros de tela y los costos de capital. Los filtros de tela por lo general son diseñados para operar a una caída de presión específica. La relación de G/T debe ser seleccionada para minimizar los costos anuales mientras se mantiene la caída de presión del diseño. Los requisitos de energía para los ventiladores pueden ser calculados por medio de la siguiente relación:

$$\text{Potencia del Ventilador (Kw-hora/año)} = 1.81 \times 10^{-4}(V)(P)(t) \quad (\text{Ecuación 5.3-1})$$

en donde V es la velocidad de flujo (en pies cúbicos reales por minuto, $ACFM$), P es la caída de presión (en pulgadas de agua), t son las horas de operación por año, y 1.81×10^{-4} es un factor de conversión. Una vez que la potencia del ventilador es determinada, ella puede ser multiplicada por el costo de la electricidad (en $\$/KW-hr$) para determinar el costo eléctrico.¹⁶

La figura 5.3-14 muestra las curvas del costo anual para cuatro tipos diferentes de filtros de tela.¹⁷ Las curvas representan los costos anuales para los mismos diseños de filtros de tela usados en la Figura 5.3-9. Para cada tipo de filtro de tela, valores idénticos para los parámetros de diseño listados en la Tabla 5.3-6 fueron usados para preparar las curvas en ambas figuras.

Figura 5.3-14. Costos de Operación Anuales para los Filtros de Tela

(Referencia 17)

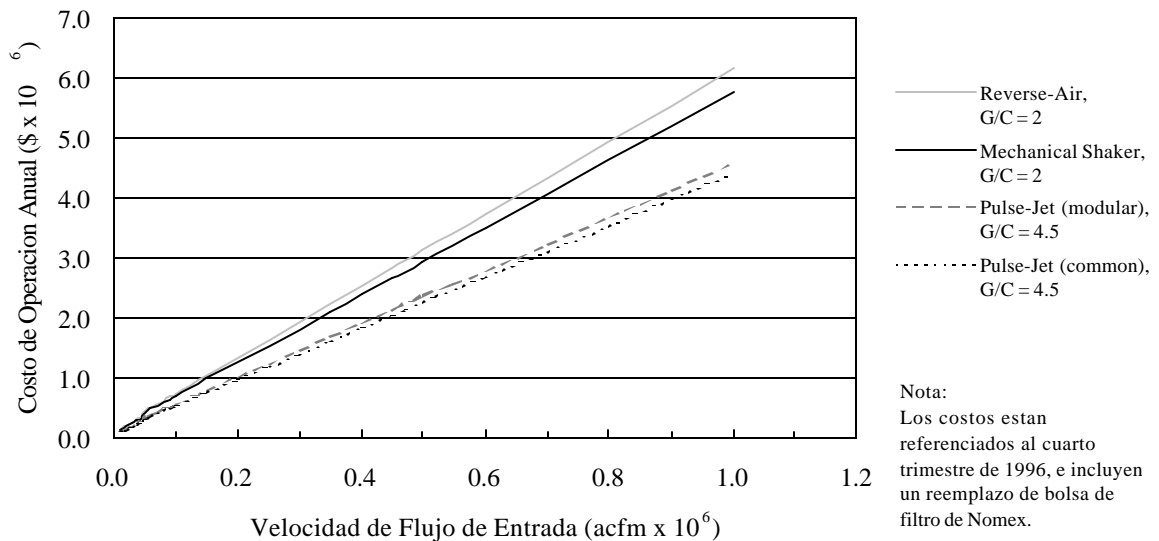


Table 5.3-6. Parámetros de Costo Anuales para los Filtros de Tela (Referencia 17)

Parámetro	Descripción	Valores Típicos
Parámetros de Costo Directos		
Factor de Operación (FO)	Horas de operación del filtro de tela por año	8,640 horas / año
Salario de Mano de Obra del Operador (MOO)	Salario por la mano de obra del operador	\$12.50/ hora ^a
Factor de Turno del Operador (TO)	Fración del turno del operador en el filtro	0.25 ^b
Salario de Mano de Obra de Mantenimiento (MR)	Salario por mano de obra de mantenimiento	1.1 x MOO ^b
Factor de Turno de Mantenimiento (TM)	Fración del turno de mantenimiento en el filtro	0.125 ^b
Tarifa eléctrica (TE)	Costo de la electricidad	\$0.07/kW-hr ^a
Aire comprimido (AC)	Costo del aire comprimido	\$0.18/1000 pies cúbicos estándares ^a
Desecho del Polvo (DP)	Costo del desecho del polvo	\$0.5531 ^c
Factor de Recuperación del Capital (FRC)	Función de (b) e (i)	
Parámetros de Costo Indirectos		
Factor de Gasto de Mantenimiento (GM)	Fración de los costos totales de mano de obra	0.60 ^b
Tarifa de Interés Anual (I)	Costo de oportunidad del capital	7 por ciento ^b
Vida de Operación (n)	Vida de operación anticipada del filtro de tela	20 años ^b
Factor de Recuperación del Capital (FRC)	Función de (n) e (i)	0.0944 ^c
Vida de las Bolsas (b)	Vida de operación anticipada de las bolsas	2 años ^b
Impuestos (IMP)	Fración de la ICT ^d	0.01 ^b
Aseguranza (SEG)	Fración de la ICT ^d	0.01 ^b
Costos Administrativos (CA)	Fración de la ICT ^d	0.02 ^b

^a Estimados para 1996 a partir de la información disponible en la actualidad.

^b Estimaciones a partir de las Hojas de Trabajo para el Costo del Control "CO\$T-AIR" (Referencia 17).

^c El Factor de Recuperación del Capital se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1},$$

en donde i = tasa de interés (en fracción) y n (δb) = vida de operación (en años).

^d La inversión capital total ICT puede ser escalada a los valores actuales usando los Indices *Vatavuk* para el Costo del Control de la Contaminación del Aire, *Vatavuk Air Pollution Control Cost Indices (VAPCCI)*, descritos en el apéndice B.

Table 5.3-7. Factores de Costo Anuales para los Filtros de Tela (Referencia 17).

Artículo de Costo	Fórmula ^a	Factor
Costos Directos		
Mano de Obra		
Operador (MOO)	$(FO) \times (SO) \times (OS)$	A
Mantenimiento (MOM)	$(FO) \times (SM) \times (TM)$	0.55 A
Electricidad (E)	Potencia ^b \times (TE)	E
Aire Comprimido (C)	$(AC) \times$ pies cúbicos estándares por año	C
Desecho del Polvo (D)	$(DP) \times$ toneladas por año	D
Recuperación Capital de las Bolsas	$(FRCB) \times (BOLSA)^c$	<u>0.5531 BOLSA</u>
Costo Directo Total (DC)		$1.55 A + E + C + D + 0.5531 BOLSA$
Costos Indirectos		
Gastos de Mantenimiento	$(GM) \times (MOO + MOM)$	0.93 A
Recuperación del Capital	$(FRC) \times (ICT)$	0.0944 ICT
Impuestos	$(IMP) \times (ICT)$	0.01 ICT
Aseguranza	$(SEG) \times (ICT)$	0.01 ICT
Costos Administrativos	$(CA) \times (ICT)$	<u>0.02 ICT</u>
Costo Indirecto Total (CI)		$0.93 A + 0.1344 ICT$
Costo Anual Total (CD + CI)		$2.48 A + 0.1344 ICT + 0.5531 BOLSA + E + C + D$

^a Incluye los valores descritos también en la Tabla 5.3-6.

^b Igual al los requisitos de potencia totales, por ejemplo, del ventilador, del agitador, etc.

^c BOLSA = el costo de capital de las bolsas de filtro únicamente.

Aunque la misma tendencia en costos es observada tanto para los costos anuales como para los costos de ICT, en los casos en donde los costos de los filtros de tela de aire invertido son los más altos y los del pulsorreactor los más bajos, la ventaja de los filtros de tela en términos de costos anuales no es tan precisos como con los costos de capital.

5.3.7 Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios

La vasta mayoría de las demandas de energía para los filtros de tela son para la operación del ventilador. Otros requisitos de energía menores son para la operación del mecanismo de limpieza y la compresión del aire. Los requisitos de energía del ventilador pueden ser calculados a partir de la fórmula mencionada anteriormente. Los requisitos de energía para los mecanismos de limpieza son muy específicos del sitio.¹⁶

El impacto ambiental secundario principal de los filtros de tela es la generación de residuos sólidos. Los filtros de tela recolectan grandes cantidades de materia particulada, la cual debe ser desechada en muchos casos. Las características de los residuos dependen al fin de la instalación específica. En la

mayoría de las aplicaciones los filtros de tela recolectan polvo que no es tóxico y es adecuado para desechar en rellenos sanitarios, pero algunos polvos son valiosos y pueden ser reciclados o vendidos. En algunas aplicaciones, los filtros de tela podrían recolectar polvos que son tóxicos o peligrosos. Tales polvos requerirán un manejo y tratamiento especial previo a ser desechados .²

5.3.8 Referencias para la Sección 5.3

1. Cooper, C.D and F.C. Alley. *Air Pollution Control: A Design Approach*. 2nd ed. Waveland Press, Prospect Heights, Illinois. 1994
2. Fabric Filter Manual (revised), The MacIvaine Co., Northbrook, Ill. March 1996
3. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a, NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
4. McKenna, J.D. and J.H. Turner. *Fabric Filter-Baghouses I: Theory, Design, and Selection (A Reference Text)*. ETS Inc., Roanoke, Virginia. 1993.
5. Jensen, R.M. Give Reverse-air Fabric Filters a Closer Look. *Power*, 139:2. February 1995.
6. Schlotens, M.J. Air Pollution Control: A Comprehensive Look.. *Pollution Engineering*. May 1991.
7. Pontius, D.H. Characterization of Sonic Devices Used for Cleaning Fabric Filters. *J. Air Pollution Control Association*. 35:1301. December 1985.
8. Belba, V.H., W.T. Grubb, and R. Chang. The Potential of Pulse-Jet Baghouses for Utility Boilers. Part 1: A Worldwide Survey of Users. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 42:2. February 1992.
9. Carr, R.C. Pulse-Jet Fabric Filters Vie for Utility Service. *Power*. December 1988.
10. Carr, R.C. and W.B. Smith. Fabric Filter Technology for Utility Coal-Fired Power Plants, Part V: Development and Evaluation of Bag Cleaning Methods in Utility Baghouses. *J. Air Poll. Control Assoc*. 34(5):584. May 1984.
11. Oglesby, S., Jr. Future Directions of Particulate Control Technology: A Perspective. *J. Air Waste Management Assoc*. 40(8): 1184-1185. August 1990.
12. Grafe, T. and K. Gregg. Baghouse and Cartridge Dust Collectors: A Comparison. *American Ceramic Society Bulletin*. 72:9. September 1993.

13. Parkinson, G. A Hot and Dirty Future For Baghouses. Chemical Engineering. April 1989.
14. Croom, M.L. New Developments in Filter Dust Collection. Chemical Engineering. February 1996.
15. Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). Volume I (Fifth Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.
16. OAQPS Control Cost Manual (Fourth Edition, EPA 450/3-90-006) U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. January 1990.
17. Vataavuk, W.M. "CO\$T-AIR" Control Cost Spreadsheets. Provided by the Innovative Strategies and Economics Group of the Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.

5.4 LIMPIADORES EN HUMEDO

Los limpiadores en humedo son dispositivos de control que dependen del contacto directo e indirecto de un líquido (gotas, espuma o burbujas) con la materia en partículas. El líquido con la MP recolectada es entonces recolectado fácilmente. Los limpiadores en humedos son clasificados generalmente por el método que se usa para inducir el contacto entre el líquido y la MP, e. e. aspersión, el lecho empacado y las placas. Los limpiadores también son descritos con frecuencia como bajos, medianos o altos en energía, en donde la energía se expresa frecuentemente como la caída de presión a través del limpiador. Esta sección trata los principios básicos de operación, diseños, eficiencia de recolección, aplicabilidad y costos de los limpiadores humedos.

Los limpiadores húmedos poseen ventajas importantes en comparación con otros dispositivos para la recolección de MP. Pueden recolectar polvos inflamables y explosivos de manera segura. Absorber contaminantes peligrosos y recolectar neblinas. Los limpiadores también pueden enfriar corrientes de gas caliente. También existen algunas desventajas asociadas con los limpiadores en húmedo. Por ejemplo, los limpiadores tienen el potencial de ser dañados por la corrosión y el congelamiento. Además, el uso de los limpiadores en húmedo puede conducir a problemas de contaminación por aguas y sólidos residuales.¹ Estas desventajas pueden ser minimizadas o evitadas con un buen diseño de limpiadores.

5.4.1 Recolección de Partículas y Mecanismos de Penetración

La forma dominante de captura de MP en la mayoría de los limpiadores industriales en húmedo es la impacción inercial de la MP sobre las gotas de líquido. La difusión browniana también conduce a la recolección de partículas, pero sus efectos sólo son significantes para las partículas de aproximadamente 0.1 micrómetros (: m) de diámetro o menores.² La intercepción directa es otro mecanismo de recolección de los limpiadores. Los mecanismos de recolección menos importantes de los limpiadores utilizan la gravitación, la electrostática y la condensación.²

La impacción inercial en los limpiadores en húmedo ocurre como resultado de un cambio en la velocidad entre la MP suspendida en un gas, y el gas en sí. A medida que el gas se acerca a un obstáculo, tal como una gota de líquido, el gas cambia de dirección y fluye alrededor de la gota. Las partículas en el gas también se acelerarán e intentarán de cambiar dirección para pasar alrededor de la gota. Las fuerzas inerciales intentarán mantener el movimiento de la partícula hacia adelante y hacia el objeto, pero la fuerza fluída intentará arrastrar a la partícula alrededor de la gota con el gas. El movimiento resultante de la partícula es una combinación de estas fuerzas de arrastre por el fluído y de inercia. Esto resulta en una impactación para las partículas en donde domina la inercia, y en una desviación para aquellas partículas que son arrastradas por la resistencia de los fluídos.² Las partículas grandes, o sea las partículas mayores de 10 μm , son recolectadas más fácilmente por impacción inercial porque estas partículas poseen un mayor momento inercial para resistir cambios en el flujo del gas y,

por lo tanto, impactan la gota. Las partículas pequeñas (o sea, las partículas $<1 \mu\text{m}$) son más difíciles de recolectar por impacción inercial porque permanecen en las líneas de flujo del gas debido a la predominancia de la fuerza de arrastre de los fluidos.

La recolección por difusión ocurre como resultado tanto del movimiento de los fluidos como del movimiento browniano (al azar) de las partículas. Este movimiento de las partículas en la cámara del limpiadores resulta en un contacto directo entre la partícula y el líquido. Puesto que este contacto es irreversible, se realiza la recolección de la MP por el líquido. Los efectos de recolección difusionales son más significantes para las partículas menores de $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro.² La interceptación directa ocurre cuando la trayectoria de una partícula se acerca dentro de un radio del medio de recolección, el cual en un limpiador equivale a una gota de líquido. La trayectoria puede ser el resultado de la inercia, la difusión o el movimiento de los fluidos.²

La recolección gravitacional como resultado de la colisión de gotas en descenso se relaciona de manera cercana a la impacción y a la interceptación, y es un mecanismo menor en algunos limpiadores.² El asentamiento gravitacional de las partículas por lo general no es un factor debido a las altas velocidades del gas y los cortos tiempos de residencia.³ Por lo general, la atracción electrostática no es un mecanismo importante excepto en casos en donde las partículas, el líquido, o ambos, están siendo cargados deliberadamente, o en donde el limpiador sigue a un precipitador electrostático.³ Algunos limpiadores están diseñados para aumentar la captura de partículas por medio de condensación. En tales casos, la corriente cargada de polvo se encuentra sobresaturada de líquido (generalmente agua). Las partículas entonces actúan como núcleos de condensación, creciendo en tamaño a manera que más líquido se condensa alrededor de ellas y volviéndose más fáciles de recolectar mediante la impactación inercial.^{2,4}

Los mecanismos de recolección de los limpiadores en húmedo son altamente dependientes del tamaño de las partículas. La impactación inercial es el mecanismo principal de recolección para las partículas mayores de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro. La efectividad de la impactación inercial aumenta con el aumento del tamaño de las partículas. La difusión es por lo general efectiva sólo para partículas menores de $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro, con eficiencias de recolección aumentando con el aumento del tamaño de las partículas. La combinación de estos dos mecanismos principales de recolección contribuye a una eficiencia mínima de recolección para la MP de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro.⁵ La eficiencia de recolección mínima exacta para un absorbedor específico dependerá del tipo de limpiador las condiciones de operación, y la distribución de las partículas en la corriente de gas. La eficiencia de recolección de los limpiadores se discute con mayor detalle en la sección 5.4.3.

5.4.2 Tipos de Limpiadores Húmedo

Existe una gran variedad de limpiadores en húmedo que son disponibles ya sea comercialmente o que pueden ser diseñados a medida. Mientras todos los limpiadores en húmedo son similares hasta cierto grado, existen varios métodos distintos de uso del líquido absorbedor para lograr la recolección

de partículas. Los limpiadores en húmedo son clasificados por lo general de acuerdo al método que se usa para poner al gas y al líquido en contacto.

El diseño más común de un limpiador consiste en la introducción de gotas líquidas dentro de una cámara de aspersión, en donde el líquido es mezclado con la corriente de gas para promover el contacto con la MP. En un limpiador con lecho embalado, se utilizan capas de líquido para recubrir varias formas de material de embalaje que se vuelven superficies de impacción para el gas cargado de partículas. La recolección mediante un limpiador también puede ser realizada forzando el gas a altas velocidades a través de un líquido para formar corrientes de propulsión a chorro. Los líquidos también son utilizados para sobresaturar la corriente de gas, dando lugar a la limpieza de partículas por medio de condensación.

5.4.2.1 Cámaras de Aspersión

Las cámaras de aspersión son limpiadores en húmedo muy sencillos y de baja energía. En estos limpiadores, la corriente de gas cargada de partículas es introducida dentro de una cámara en donde se pone en contacto con gotas de líquido generadas por boquillas de aspersión. Estos limpiadores también son conocidos como limpiadores de aspersión preformados, puesto que el líquido es formado en gotas previo al contacto con la corriente de gas. El tamaño de las gotas generadas por las boquillas de aspersión se controla para maximizar el contacto entre el líquido y la partícula y, en consecuencia, la eficiencia de recolección del limpiador.

Los tipos comunes de cámaras de aspersión son torres de aspersión y cámaras ciclónicas. Las torres de aspersión son cámaras cilíndricas o rectangulares que pueden ser instaladas vertical u horizontalmente. En las torres de aspersión verticales, la corriente de gas fluye hacia arriba a través de la cámara y se encuentra con varios grupos de boquillas de aspersión produciendo gotas de líquido. Un de-vaporizador en la parte superior de la torre de aspersión elimina las gotas de líquido y la MP humedecida de la corriente de gas de escape. El líquido limpiador y la MP humedecida también se drenan del fondo de la torre en forma de pasta aguada. Las cámaras de aspersión horizontales operan de la misma manera, excepto por el hecho de que el gas fluye horizontalmente a través del dispositivo. Una torre de aspersión típica se muestra en la figura 5.4-1.^{1,2,5}

Una cámara de aspersión ciclónica es parecida a una torre de aspersión con una diferencia principal. La corriente de gas es introducida para producir un movimiento ciclónico dentro de la cámara. Este movimiento contribuye a velocidades de gas más altas, una separación más efectiva entre la partículas y la gota, y una eficiencia de recolección más alta.¹ Una entrada tangencial o aspas giratorias son maneras comunes de inducir el movimiento ciclónico.⁵ La figura 5.4-2 proporciona un ejemplo de una cámara de aspersión ciclónica.

5.4.2.2 Limpiadores con Lecho Embalado

Los limpiadores con lecho embalado consisten en una cámara que contiene capas de material de embalaje de diversas formas, tales como los anillos de *Raschig*, anillos de espiral, y las sillas de *Berl*, que proporcionan una gran superficie para el contacto entre el líquido y las partículas. Estos y otros tipos de embalajes se ilustran en la figura 5.4-3.^{2,5} El embalaje se detiene mediante retenes de rejilla de alambre y es sostenido por una placa cerca del fondo del limpiador. El líquido limpiador es introducido de manera uniforme sobre el embalaje y fluye hacia abajo a través del lecho. El líquido recubre el embalaje y establece una película delgada. En los diseños verticales, la corriente de gas fluye hacia arriba de la cámara (en contra-corriente al líquido). Algunos lechos embalados están diseñados horizontalmente para el flujo de gas a través del embalaje (a corriente transversa).

En los limpiadores de lecho embalado, la corriente de gas es obligada a seguir una trayectoria de circuito a través del embalaje, sobre el cual se impacta una gran parte de la MP. El líquido sobre el embalaje recolecta la MP y fluye hacia abajo de la cámara, hacia el tubo de drenaje al fondo de la torre. Un eliminador de neblina (también llamado un “de-vaporizador”) se posiciona típicamente por encima/después del embalaje y el almacén de líquido limpiador. Cualquier líquido limpiador y MP humedecida encauzados en la corriente de gas tratado serán removidos por el eliminador de neblina y devueltos para vaciarse a través del lecho embalado. Un limpiador con lecho embalado típico se ilustra en la figura 5.4-4.^{2,5}

En un limpiador con lecho embalado, las concentraciones altas de MP pueden obstruir el lecho, de ahí que exista la limitación de estos dispositivos a tratar sólo cargas relativamente bajas de polvo.⁵ La obstrucción es un problema serio para los limpiadores con lecho embalado porque el embalaje es más difícil para alcanzar y limpiar que en otros diseños de limpiador.² Se encuentran disponibles limpiadores de lecho móvil embalados con esferas de plástico de baja densidad que tienen un movimiento libre dentro del lecho embalado.⁵ Estos limpiadores son menos susceptibles a la obstrucción debido al movimiento incrementado del material de embalaje. En general, los limpiadores con lecho embalado son más apropiados para absorber gases que para absorber partículas debido a los altos requisitos de mantenimiento para el control de la MP.^{1,2}

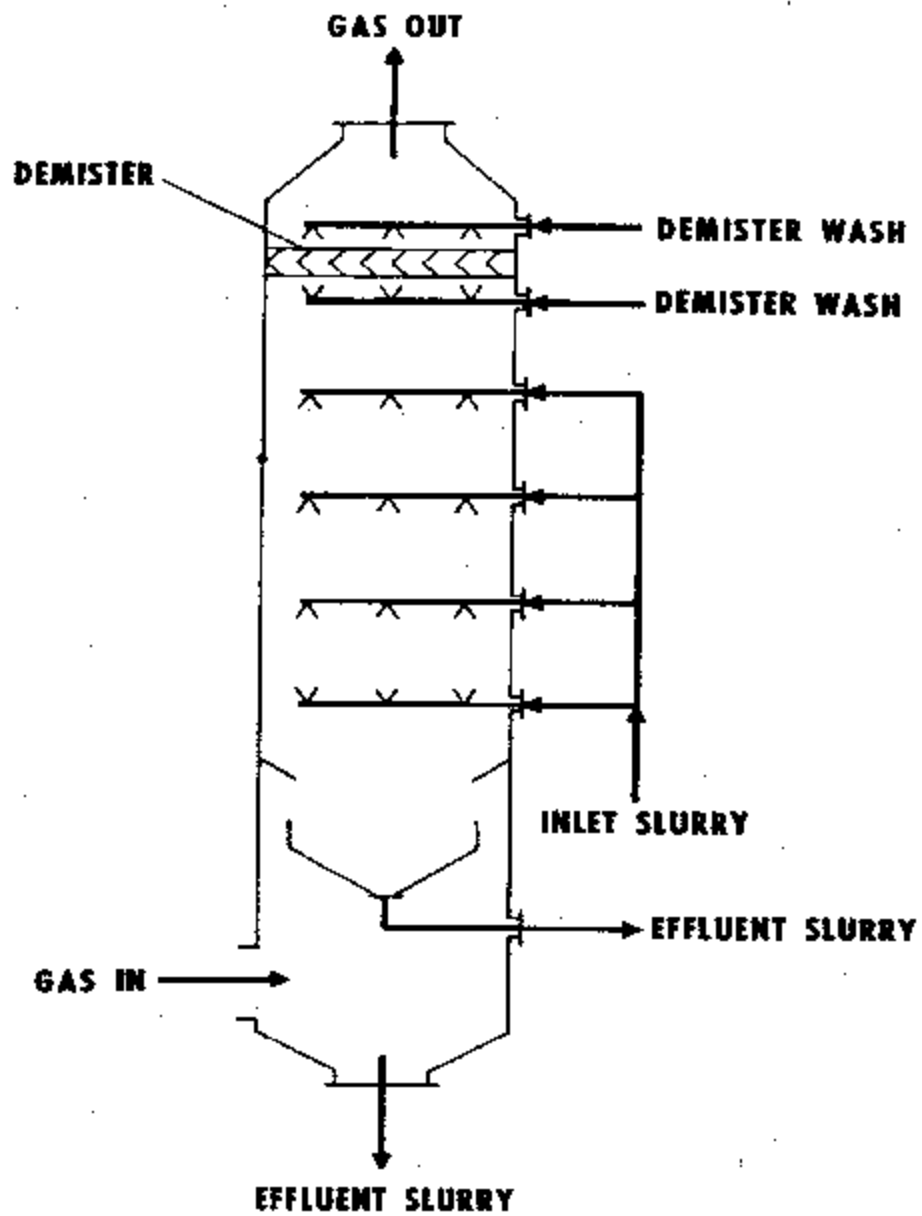


Figure 5.4-1. Schematic Diagram of a Spray Tower Scrubber (Reference 2).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-1

<i>Gas Out</i> / Gas Tratado	<i>Inlet Slurry</i> / Lodo Contaminado
<i>Gas In</i> / Gas Contaminado	<i>Effluent Slurry</i> / Lodo Residual
<i>Demister</i> / Desvaporizador	<i>Demister Wash</i> / Lavado de desvaporizador

Figura 5.4-1. Diagrama Esquemático de un Limpiador con Torre de Aspersión (Referencia 2).

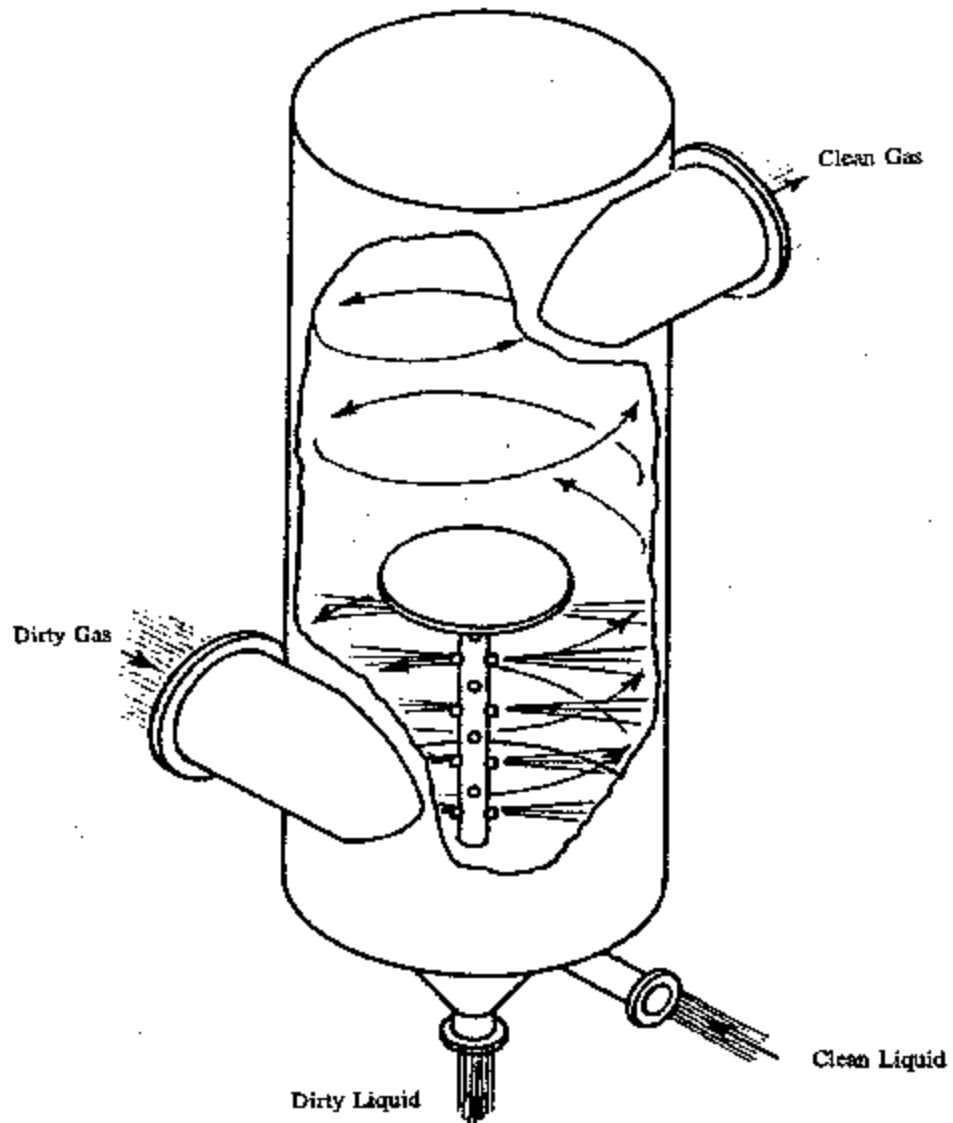


Figure 5.4-2. Schematic Diagram of a Cyclonic Spray Chamber Scrubber (Reference 1).

Figura 5.4-2. Diagrama Esquemático de un Limpiador con Cámara de Aspersión Ciclónica (Referencia 1).
Traducción de los Términos de la Figura 5.4-2

Clean Gas / Gas Limpio

Dirty Gas / Gas Contaminado

Clean Liquid / Líquido Limpio

Dirty Liquid / Líquido Contaminado

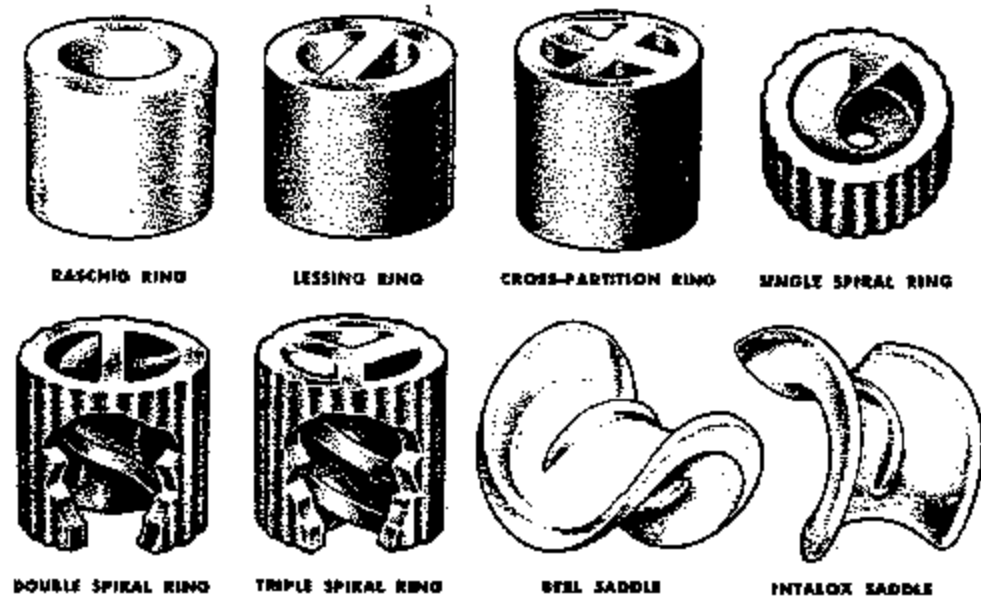


Figure 5.4-3. Typical Packing Materials for Packed Bed Scrubbers (Reference 2).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-3

Raschig Ring / Anillo de Raschig

Lessing Ring / Anillo de Lessing

Cross-Partition Ring / Anillo con Tabiques Cruzados

Single Spiral Ring / Anillo con Espiral Sencilla

Double Spiral Ring / Anillo con Espiral Doble

Triple Spiral Ring / Anillo con Espiral Triple

Berl Saddle / Silla de Berl

Intalox Saddle / Silla Intalox

Figura 5.4-3. Materiales de Embalaje Típicos para los Limpiadores con Lecho Embalado (Referencia 2).

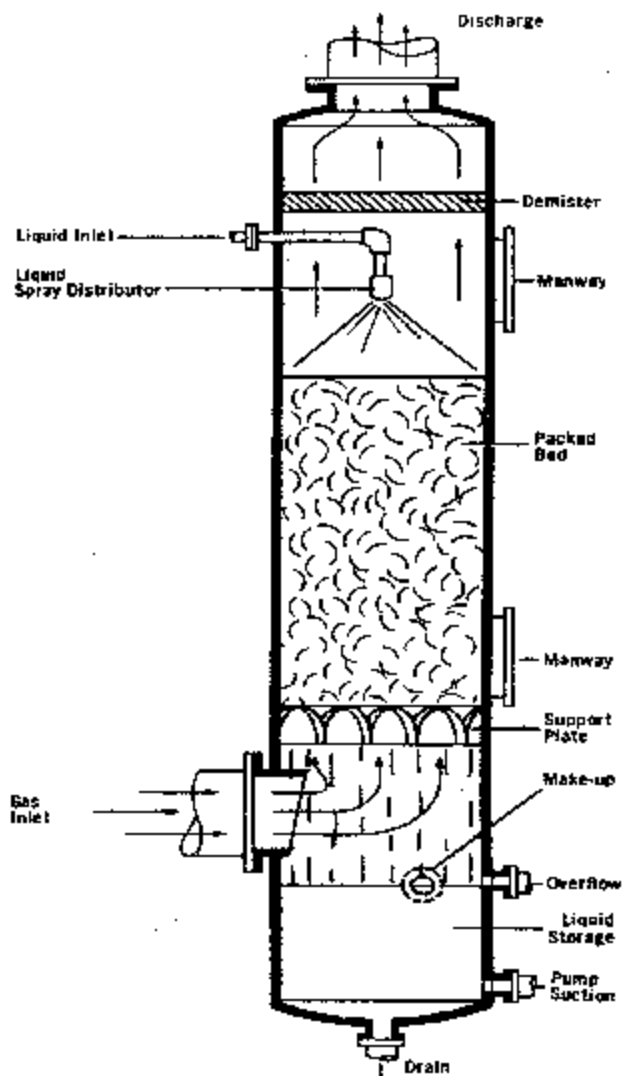


Figure 5.4-4. Schematic Diagram of a Packed Tower Scrubber (Reference 2).

Figura 5.4-4. Diagrama Esquemático de un Limpiadores con Torre Repleta (Referencia 2).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-4

<i>Liquid Spray Distributor</i> / Distribuidor del Aerosol Líquido	<i>Demister</i> / De-vaporizador
<i>Discharge</i> / Descarga	<i>Manway</i> / Acceso para el Operador
<i>Liquid Inlet</i> / Entrada del Líquido	<i>Packed Bed</i> / Lecho Embalado
<i>Gas Inlet</i> / Entrada del Gas	<i>Make-up</i> / Compensador
<i>Support Plate</i> / Placa de Sostén	<i>Overflow</i> / Desborde
<i>Drain</i> / Tubo de Drenaje	<i>Pump Suction</i> / Succión por Bomba
<i>Liquid Storage</i> / Almacenamiento de Líquido	

5.4.2.3 Limpiadores con Placas de Repercusión

Un limpiador con placas de repercusión es una cámara vertical con placas montadas horizontalmente dentro de un armazón hueco. Los limpiadores con placas de repercusión operan como dispositivos de recolección de MP a contracorriente. El líquido limpiador fluye hacia abajo de la torre mientras que la corriente de gas fluye hacia arriba. El contacto entre el líquido y el gas cargado de partículas ocurre sobre las placas. Las placas están equipadas con aperturas que permiten que el gas atraviese. Algunas placas están perforadas o tienen ranuras, mientras que las placas más complejas tienen aperturas que semejan válvulas. La figura 5.4-5 muestra los diseños de placa que son usados comúnmente en los limpiadores con placas de repercusión.^{2,5}

La placa de repercusión más sencilla es la placa tamizadora, la cual posee perforaciones redondas. En este tipo de limpiador el líquido absorbedor fluye sobre las placas y el gas fluye hacia arriba a través de los agujeros. La velocidad del gas evita que el líquido fluya hacia abajo a través de las perforaciones. El contacto entre el gas, el líquido y las partículas se logra dentro de la espuma generada por el gas pasando a través de la capa de líquido. Las placas complejas, tales como las placas con diafragmas de burbuja o trabas, introducen una manera adicional de recolectar MP. Las placas con diafragmas de burbuja y trabas colocadas por encima de las perforaciones de las placas obligan al gas a devolverse antes de escapar de la capa de líquido. Mientras el gas dá vueltas para evitar los obstáculos, la mayoría de la MP no puede hacerlo y es recolectada por impacción sobre las burbujas o las trabas. Los diafragmas de burbujas y similares también evitan que el líquido fluya hacia abajo de las perforaciones si se reduce el flujo de gas.

En todos los tipos de limpiadores con placas de repercusión, el líquido limpiador fluye a través de cada placa y hacia abajo por el interior de la torre hasta caer sobre la placa que se encuentra al fondo. Después de la placa del fondo, el líquido y la MP recolectada fluyen desde el fondo hacia afuera de la torre. Un limpiador con placas de repercusión típico se muestra en la figura 5.4-6.^{2,5} Los limpiadores con placas de repercusión por lo general están diseñados para proporcionar el acceso del operador a cada caja, volviéndolos relativamente fáciles de limpiar y mantener.² En consecuencia, los limpiadores con placas de repercusión son más apropiados para la recolección de MP que los limpiadores con lecho embalado. Las partículas mayores de 1 : m en diámetro pueden ser recolectadas efectivamente por medio de limpiadores con placas de repercusión, pero muchas partículas <1 μm penetrarán estos dispositivos.⁵

5.4.2.4 Limpiadores con Ayuda Mecánica

Los limpiadores con ayuda mecánica (LAM) emplean un ventilador o hélice impulsora accionado por un motor para mejorar el contacto entre el gas y el líquido. Generalmente en los LAM, el líquido limpiador es rociado hacia las aspas del ventilador o de la hélice impulsora. Los ventiladores y las hélices impulsoras son capaces de producir gotas muy finas de líquido con velocidades muy altas. Estas gotas son efectivas en el contacto con la MP fina. Una vez que la MP se ha impactado sobre las

gotas, ésta es removida normalmente por un movimiento ciclónico. Los limpiadores con ayuda mecánica son capaces de obtener altas eficiencias de recolección, pero sólo con un alto consumo de energía acorde. Un ejemplo de un Limpiadores con ayuda mecánica se proporciona en la figura 5.4-7.^{1,2,5}

Debido a que muchas partes movibles se encuentran expuestas al gas y al líquido en un LAM, estos limpiadores tienen requisitos altos de mantenimiento. Las partes mecánicas son propensas a la corrosión, la acumulación de MP, y el desgaste. En consecuencia, los limpiadores con ayuda mecánica tienen aplicaciones limitadas para el control de la MP.^{2,5}

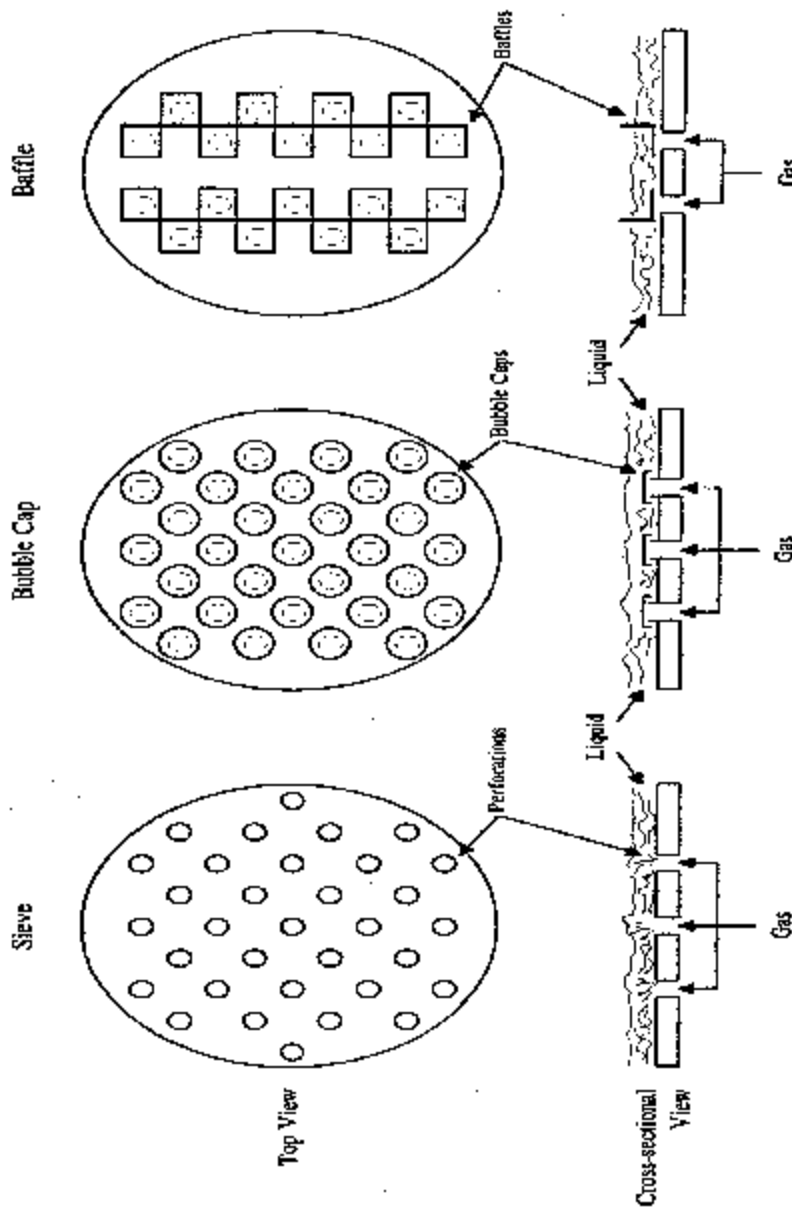


Figure 5.4-5. Common Plate Designs for Impingement Plate Scrubbers (adapted from Reference 2).

Figura 5.4-5. Diseños Comunes de Placa para los limpiadores con Placas de Repercusión (Referencia 2).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-5

Overview = Perspectiva General	Perforations = Perforaciones
Sieve = Tamiz	Cross-sectional View = Perspectiva de corte transversal
Bubble Cap = Diafragma de Burbuja	Gas = Gas
Baffle = Traba	Liquid = Líquido

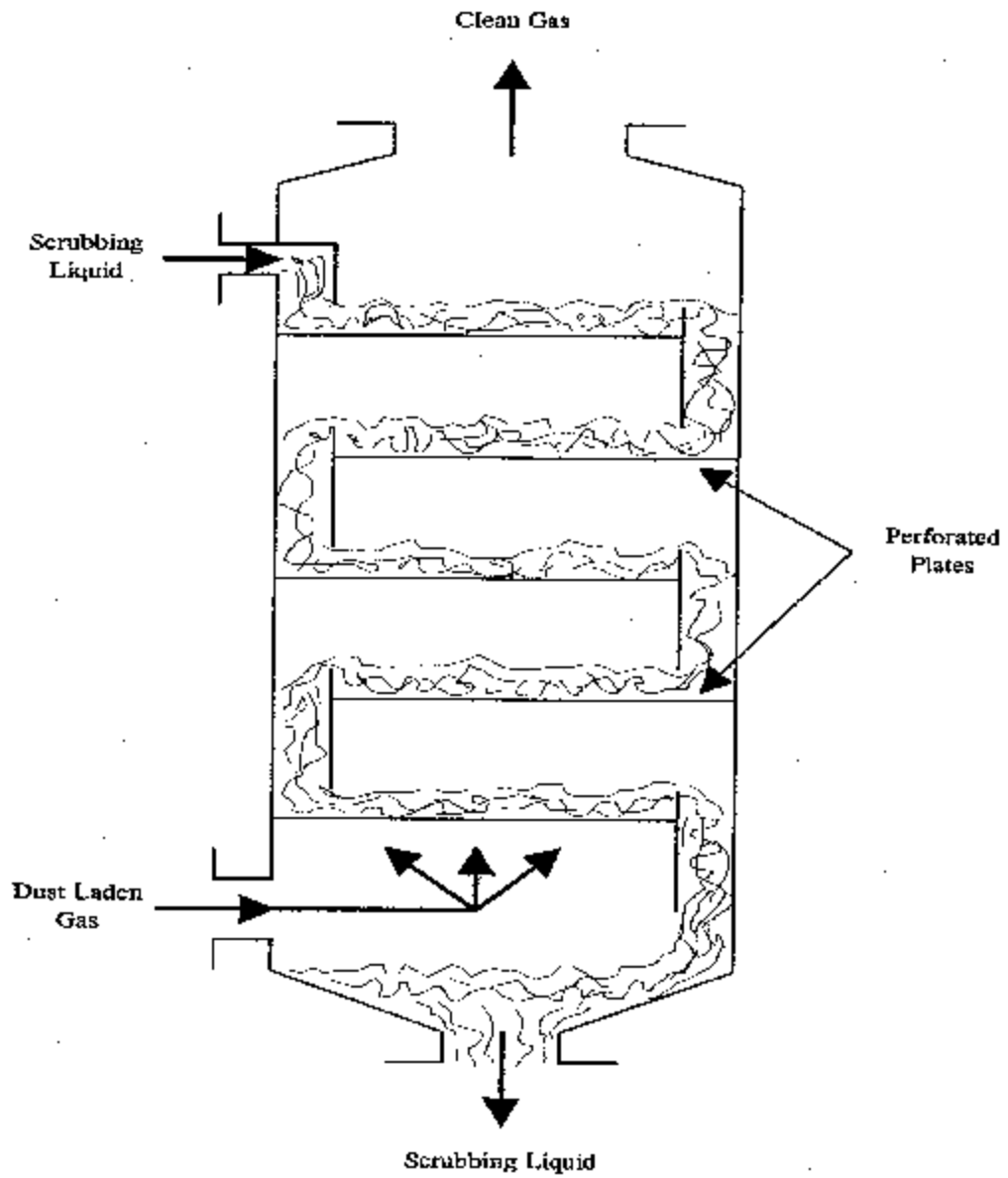


Figure 5.4-6. Schematic Diagram of a Plate Tower Scrubber (adapted from Reference 2).

Figura 5.4-6. Diagrama Esquemático de una Torre Limpiadores con Placas (referencia 2).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-6

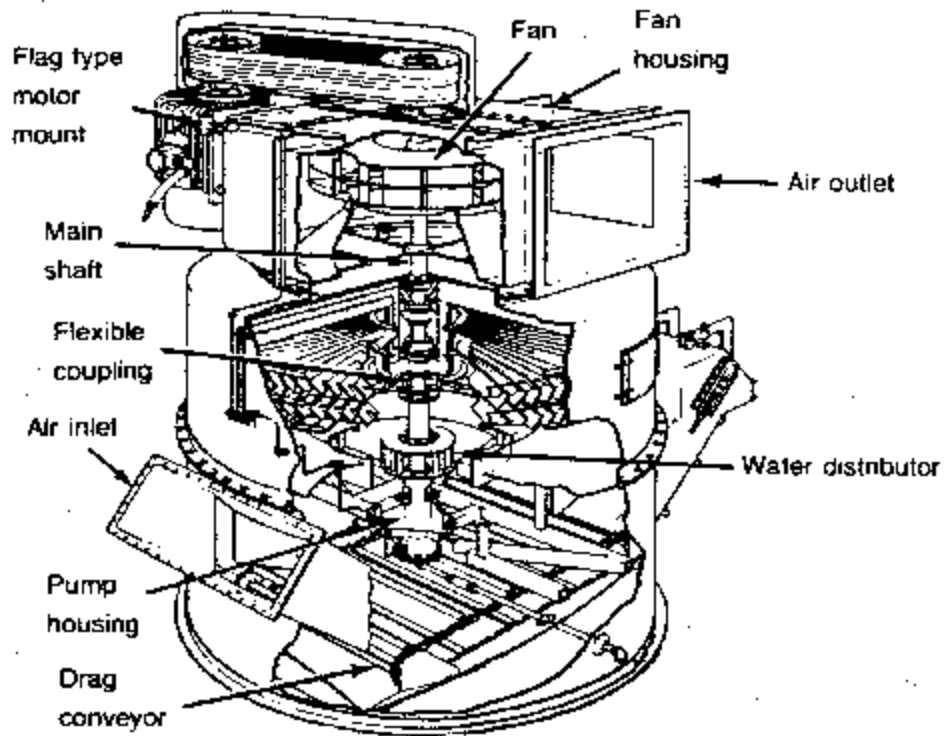


Figure 5.4-7. Diagram of a Mechanically-aided Scrubber (Reference 1).

Clean Gas / Gas Limpio

Perforated Plates / Placas Perforadas

Scrubbing Liquid / Líquido Absorbedor

Dust Laden Gas / Gas Cargado de Partícul

Figura 5.4-7. Diagrama de un Limpiadores con Ayuda Mecánica (Referencia 1).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-7

Flag Type Motor Mount = Soporte Tipo Pabellón del Motor
Main shaft = Eje Principal
Flexible coupling = Enganche Flexible
Pump Housing = Caja de la Bomba
Drag Conveyor = Transportador por Arrastre

Fan = Ventilador
Fan Housing = Caja del Ventilador
Air Outlet = Salida de Aire
Air Inlet = Entrada de Aire
Water Distributor = Distribuidor de Agua

5.4.2.5 Limpiadores Tipo Venturi

Un Limpiadores tipo Venturi, o de aerosol atomizado por gas, acelera la corriente de gas para atomizar el líquido absorbedor y mejorar el contacto entre el gas y el líquido. En un Limpiadores tipo Venturi, se incorpora una sección de garganta dentro del conducto que fuerza a la corriente de gas a acelerarse a medida que el conducto se estrecha y después se expande. A medida que el gas entra a la garganta tipo Venturi, tanto la velocidad del gas como la turbulencia aumentan. El líquido Limpiador es rociado dentro de la corriente de gas antes de que el gas alcance la garganta de Venturi. El líquido Limpiador enseguida es atomizado en pequeñas gotitas por la turbulencia en la garganta y la interacción entre gotas y partículas aumenta. Después de la sección de garganta en un absorbedor tipo Venturi, la MP humedecida y las gotas de líquido en exceso son separadas de la corriente de gas por un movimiento ciclónico y/o un eliminador de neblina. Los limpiadores tipo Venturi tienen la ventaja de ser sencillos en su diseño, fáciles de instalar y con requisitos bajos de mantenimiento.¹ Un ejemplo de un absorbedor tipo Venturi se proporciona en la figura 5.4-8.

El rendimiento de un limpiadores tipo Venturi depende hasta cierto grado de la velocidad del gas a través de la garganta. Varios limpiadores tipo Venturi han sido diseñados para permitir el control de la velocidad variando la anchura de la garganta tipo Venturi.^{2,5} Debido a la alta interacción entre la MP y las gotas, los limpiadores tipo Venturi son capaces de altas eficiencias de recolección para la MP pequeña. Desafortunadamente, aumentar la eficiencia de un Limpiadores tipo Venturi requiere aumentar la caída de presión la cual, a su vez, aumenta el consumo de energía.¹

5.4.2.6 Limpiadores con Orificio

Los limpiadores con orificio, también conocidos como limpiadores por encuzamiento o autoinducidos, obligan a la corriente de gas a pasar sobre la superficie de un depósito de líquido absorbedor a medida que entra en un orificio. Con las altas velocidades típicas de este tipo de limpiador el líquido del depósito se encauza en la corriente de gas en forma de gotas. A medida que aumenta la velocidad y la turbulencia del gas con el paso del gas a través de un orificio angosto, la interacción entre la MP y las gotas de líquido también aumenta. La materia particulada y las gotas son removidas enseguida de la corriente de gas por repercusión sobre una serie de trabas con que el gas se encuentra después del orificio. El líquido y la MP recolectados se vacían desde las trabas una vez más hacia el depósito de líquido debajo del orificio.^{2,5} Los limpiadores con orificio pueden recolectar

eficientemente partículas mayores de 2 : m de diámetro.^{1,5} Algunos limpiadores con orificio están diseñados con orificios ajustables para controlar la velocidad de la corriente de gas. Un absorbedor con orificio típico se muestra en la figura 5.4-9.

Los limpiadores con orificio generalmente tienen pocas demandas de líquido, puesto que usan el mismo líquido absorbedor durante períodos prolongados de tiempo.¹ Debido a que los limpiadores con orificio son relativamente sencillos en diseño y generalmente poseen pocas partes móviles, la mayor preocupación de mantenimiento es la eliminación del sedimento residual que se acumula al fondo del limpiador. Los limpiadores con orificio raras veces se vacían continuamente desde el fondo porque un depósito estático de líquido limpiador se necesita todo el tiempo. Por lo tanto, el sedimento es removido por lo general con un eyector de sedimento que opera como una cinta transportadora. A medida que el sedimento se asienta hacia el fondo del limpiador, cae sobre el eyector y es transportado hacia arriba y fuera del limpiadores . La figura 5.4-10 muestra un eyector de sedimento típico.²

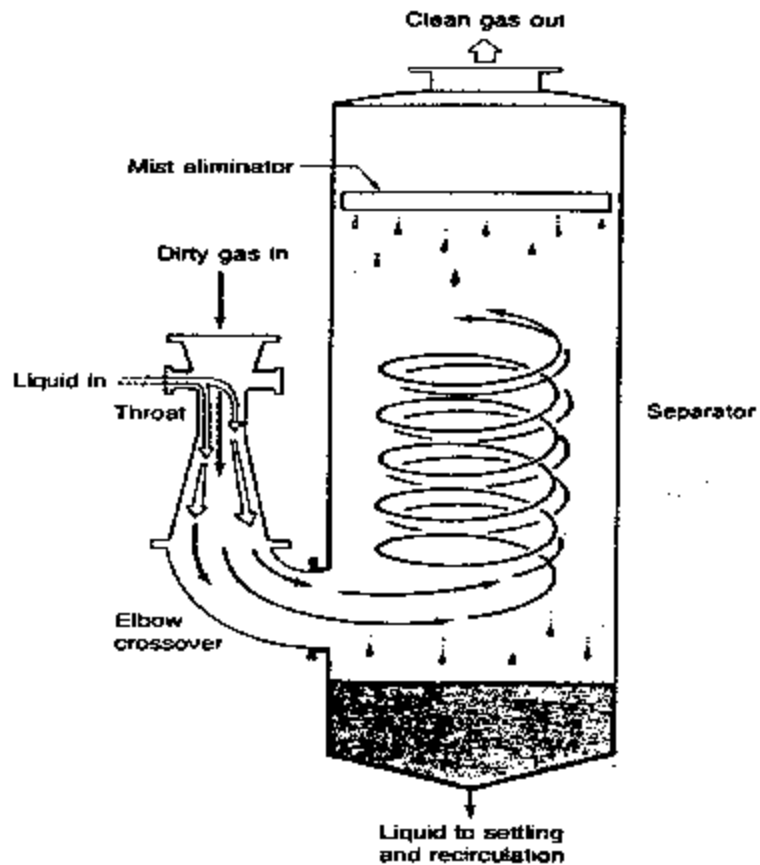


Figure 5.4-8. Schematic Diagram of a Venturi Scrubber with Cyclonic Separation (Reference 1).

Figura 5.4-8. Diagrama Esquemático de un Limpiador Tipo Venturi con Separación Ciclónica (Ref. 1).

Traducción de los Términos de la Figura 5.4-8

<i>Clean Gas Out</i> / Gas de Salida Tratado	<i>Mist eliminator</i> / Eliminator de Neblina
<i>Dirty Gas In</i> / Gas de Entrada Contaminado	<i>Separator</i> / Separador
<i>Throat</i> / Garganta	<i>Elbow Crossover</i> / Cruce de Codo
<i>Liquid to Settling and Recirculation</i> / <i>Líquido hacia el Asentamiento y la Recirculación</i>	

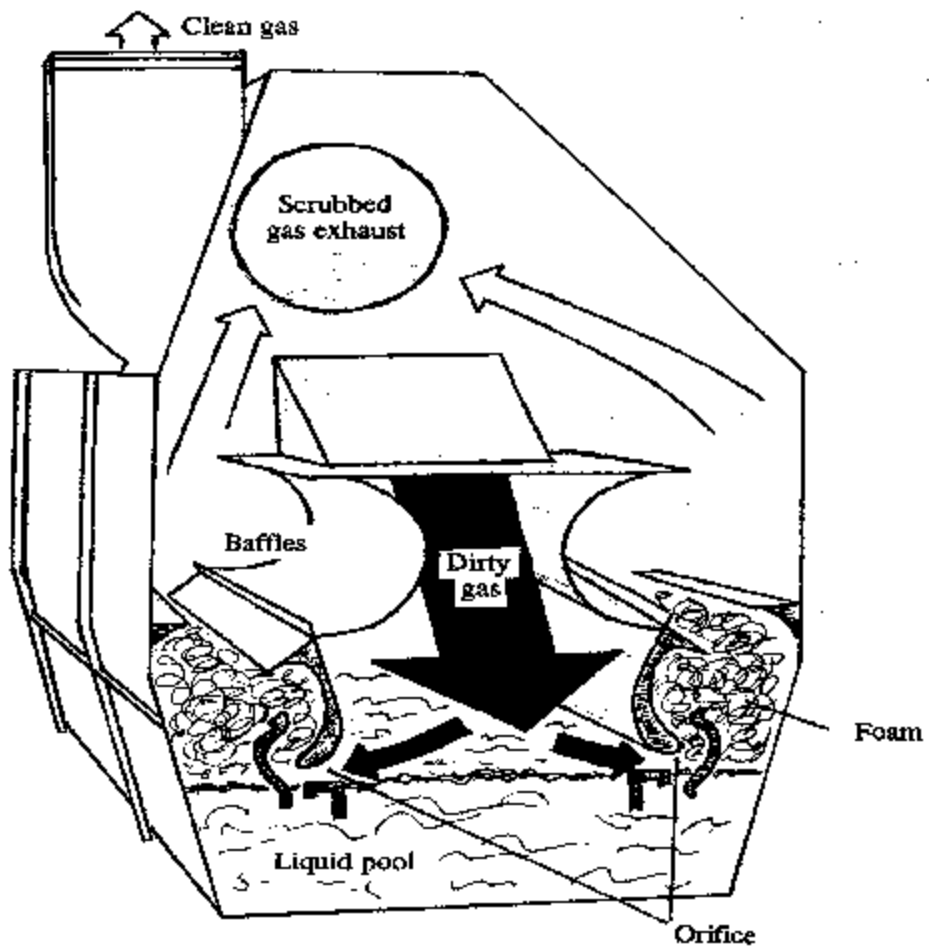


Figure 5.4-9. Diagram of an Orifice Scrubber (Reference 1).

Figura 5.4-9. Diagrama de un Limpiador con Orificio (Referencia 1).
Traducción de los Términos

Clean Gas = Gas Tratado	Scrubbed Gas Exhaust = Escape de Gas Absorbedor
Dirty Gas = Gas Contaminado	Foam = Espuma
Baffles = Trabas	Liquid Pool = Depósito de Líquido
Orifice = Orificio	

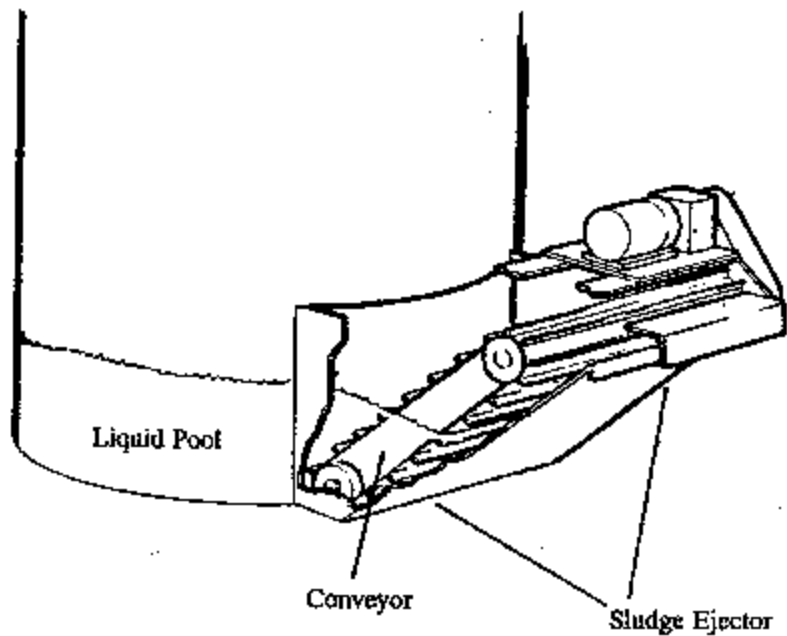


Figure 5.4-10. Diagram of a Sludge Ejector in an Orifice Scrubber (Reference 2).

Figura 5.4-10. Diagrama de un Ejector de Sedimento Residual

en un Limpiador

con Orificios (Referencia 2).

Traducción de los Términos

Liquid Pool = Depósito de Líquido
 Conveyor = Cinta Transportadora

Sludge Ejector = Ejector de Sedimento Residual

5.4.2.7 Limpiadores por Condensación

La absorción por condensación es un desarrollo relativamente reciente en la tecnología de los limpiadores en húmedo. La mayoría de los limpiadores convencionales dependen de los mecanismos de impactación y difusión para lograr el contacto entre la MP y las gotas de líquido. En un limpiador por condensación, la MP actúa como un núcleo de condensación para la formación de gotas. Por lo general, la absorción por condensación depende primero del establecimiento de condiciones de saturación en la corriente de gas. Una vez que se logra la saturación, se inyecta vapor dentro de la corriente de gas. El vapor crea una condición de supersaturación y lleva a la condensación de agua sobre la MP fina en la corriente de gas. Las gotas condensadas grandes pueden ser removidas por varios dispositivos convencionales. Típicamente, también se usa un eliminador de neblina de alta eficiencia.^{2,4}

Un absorbedor de MP de “crecimiento” por condensación de alta eficiencia ha sido desarrollado que es adecuado para tanto las instalaciones nuevas como las remozadas, y está diseñado específicamente para capturar la MP fina que escapa a los dispositivos de control de MP. Este tipo de limpiador utiliza un proceso de etapas múltiples, incluyendo cámaras de pretratamiento y crecimiento, que proporcionan un ambiente que favorece que la MP fina se coagule y forme partículas mayores. Un diagrama esquemático de este limpiador se proporciona en la figura 5.4-11.⁴

5.4.2.8 Limpiadores Cargados

Los limpiadores en húmedo cargados, o aumentados eléctricamente, utilizan efectos electrostáticos para mejorar las eficiencias de recolección para la MP fina con limpiador en húmedo. Puesto que los limpiadores en húmedo convencionales dependen de la impactación inercial entre la MP y las gotas de líquido para la recolección de MP, son generalmente inefectivos para las partículas con diámetros menores de $1 \mu\text{m}$. La precarga de la MP en la corriente de gas puede aumentar significativamente la eficiencia de recolección del para estas partículas submicrométricas. Cuando tanto las partículas como las gotas se cargan, las eficiencias de recolección para las partículas micrométricas son las más altas, aproximándose a las de un precipitador electrostático (PES).²

Existen varios tipos de limpiadores cargados en húmedo. La materia particulada puede ser cargada negativa o positivamente, impartándose una carga opuesta a las gotas. Las gotas también pueden ser bipolares (una mezcla de positivo y negativo). En este caso, la MP puede ser ya sea bipolar o unipolar. La figura 5.4-12 es un esquema de un limpiador cargado en húmedo.²

5.4.2.9 Limpiadores con Lecho de Fibra

En los limpiadores con lecho de fibra, la corriente de gas cargada de humedad pasa a través de colchas de fibras de embalaje tales como la lana de vidrio, la fibra de vidrio y fibra de acero. Las colchas de fibra también son rociadas con el líquido limpiador con frecuencia. Dependiendo de los requisitos del limpiador, pueden existir varias colchas de fibra y un dispositivo de repercusión para la remoción de la MP incluidos en el diseño. La colcha de fibras final es típicamente seca para la remoción de cualquier gota que todavía permanezca encauzada en la corriente. Los limpiadores con lecho de fibra son más apropiados para la recolección de MP soluble, o sea, la MP que se disuelve en el líquido limpiador puesto que grandes cantidades de MP insoluble obstruirán las colchas de fibra con el tiempo. Por esta razón, los limpiadores con lecho de fibra son usados con frecuencia como eliminadores de neblina, o sea, para la recolección de líquidos, más que para el control de la MP.²

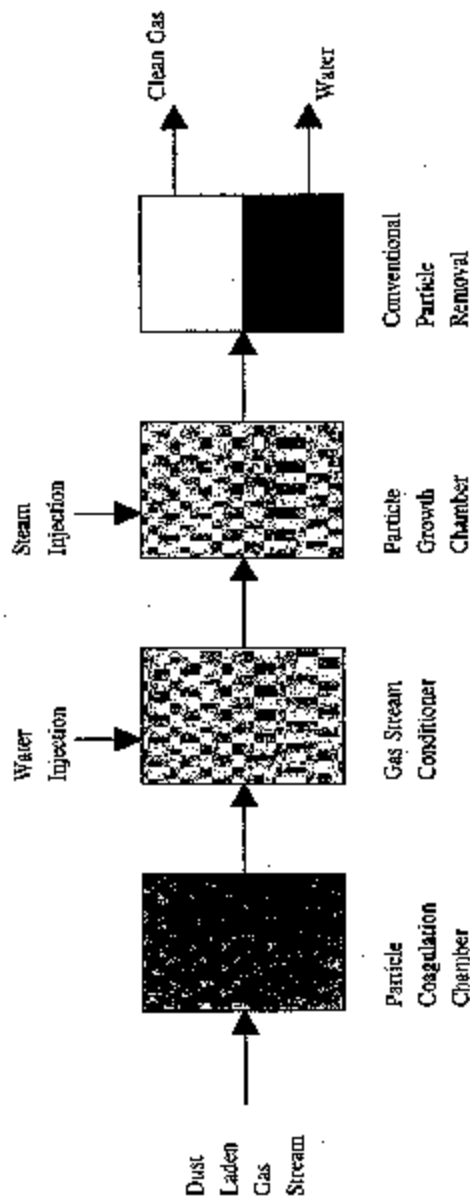


Figure 5.4-11. Schematic Diagram of a Condensation "Growth" Scrubber (adapted from Reference 4).

Figura 5.4-11. Diagrama Limpiador de Alta Eficiencia de Condensación "aumento" (Ref. 2).
Traducción de los Términos de la Figura

Clean Gas /Gas Tratado

Water Injection / Inyección de Agua

Dust Laden Gas Stream /Corriente de Gas Cargada de Polvo

Gas Stream Conditioner / Acondicionador, Corriente de Gas

Conventional Particle Removal / Eliminación Convencional de Partículas

Water = Agua

Steam Injection = Inyección de Vapor

Particle Coagulation Chamber /Cámara de Coagulación de Partículas

Particle Growth Chamber / Cámara de Crecimiento de Partículas

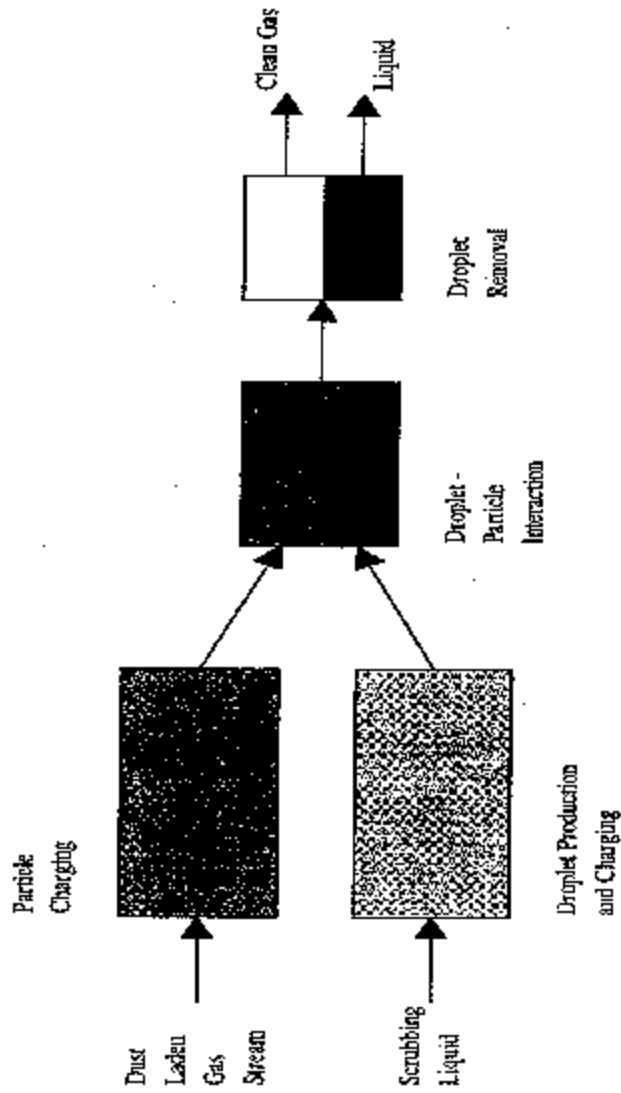


Figure 5.4-12. Schematic Diagram of Charged Wet Scrubber (adapted from Reference 2).

Figura 5.4-11. Diagrama de Limpiador Cargado en Húmedo (Ref. 2).

Traducción de Términos de la Figura 5.4-1

Dust Laden Gas Stream /

Corriente de Gas Cargada de Polvo

Droplet Production and Charging /

Producción de Gotas y Cargado

Droplet Removal / Eliminación de las Partículas

Liquid / Líquido

Scrubbing Liquid / Líquido absorbedor

Particle Charging / Cargado de las Partículas

Droplet-Particle Interaction / Interacción entre

Gotas y Partículas

Clean Gas / Gas Tratado

5.4.3 Eficiencia de Recolección

Las eficiencias de recolección para los limpiadores en húmedo son muy variables. La mayoría de los limpiadores convencionales pueden alcanzar altas eficiencias de recolección para partículas mayores de $1.0 \mu\text{m}$ de diámetro, sin embargo son dispositivos de recolección generalmente inefectivos para las partículas submicrométricas ($<1 \mu\text{m}$). Algunos limpiadores no convencionales, tales como los que operan por condensación y los cargados, son capaces de altas eficiencias de recolección, aún para partículas submicrométricas. Las eficiencias de recolección para los limpiadores convencionales dependen de factores de operación tales como la distribución de tamaño de las partículas, la carga de polvo de entrada y la entrada de energía.

La figura 5.4-13 proporciona las curvas de eficiencia de los limpiadores para la combustión de carbón y de petróleo, y para la producción de coque. La tabla 5.4-1 presenta las eficiencias de recolección de la MP-10 y de la MP-2.5.⁶

Los limpiadores convencionales dependen casi exclusivamente de la impactación inercial para la recolección de la MP. Como se discutió previamente, la eficiencia del limpiador que depende de mecanismos de recolección por impactación inercial aumentará a medida que el tamaño de las partículas aumenta. Por lo tanto, se anticipa que la eficiencia de recolección de las partículas pequeñas ($<1 \mu\text{m}$) sea menor para estos limpiadores. La eficiencia de los limpiadores que dependen de la impactación inercial puede ser mejorada, sin embargo, aumentando la velocidad relativa entre la MP y las gotas de líquido. La velocidad en aumento resultará en más momento para toda la MP, permitiendo que las partículas pequeñas sean recolectadas por impactación. Esto puede ser logrado en la mayoría de los limpiadores incrementando la velocidad de la corriente de gas. Desafortunadamente, aumentar la velocidad del gas también aumentará la caída de presión, la demanda de energía y los costos de operación para el limpiador.^{1,2,5}

Otro factor que contribuye a una baja eficiencia en los limpiadores para las partículas pequeñas es el tiempo corto de residencia. Típicamente, una partícula permanece en la zona de contacto de un limpiador durante sólo unos pocos segundos. Esto es tiempo suficiente para recolectar las partículas grandes que son afectadas por los mecanismos de impactación. Sin embargo, puesto que las partículas submicrométricas son recolectadas más efectivamente por mecanismos de difusión que dependen del movimiento al azar de las partículas, se necesita un tiempo suficiente en la zona de contacto para que este mecanismo sea efectivo. En consecuencia, aumentar el tiempo de residencia del gas deberá también aumentar el tiempo de contacto entre partículas y líquido y la eficiencia de recolección para las partículas pequeñas.²

Una relación importante entre la concentración de polvo de entrada (carga) y la eficiencia de recolección para la MP fina en los limpiadores ha sido descubierta recientemente.⁷ Esto es, la eficiencia aumentará con el aumento en la carga de polvo. Esto sugiere que la eficiencia de eliminación del

limpiador no es constante para un diseño de limpiador en particular a menos que sea referenciado a una carga de polvo de entrada específica. En contraste, ha sido demostrado que la concentración de polvo de salida (tratada) en un limpiador es una constante, independiente de la concentración a la entrada.⁷

5.4.4 Aplicabilidad

Los limpiadores en húmedo tienen numerosas aplicaciones industriales y pocas limitaciones. Son capaces de recolectar básicamente cualquier tipo de polvo, incluyendo los polvos inflamables, explosivos, húmedos o pegajosos. Además, pueden recolectar líquidos suspendidos (tales como las neblinas) o gases únicamente o con MP simultáneamente.¹ Sin embargo, mientras que los limpiadores tienen muchas aplicaciones potenciales, existen algunas características que limitan su uso. La consideración más significativa es la eficiencia de recolección relativamente baja para la MP fina, especialmente la menor de 1.0 : m de diámetro. Por lo tanto, los limpiadores convencionales pudieran no ser apropiados para procesos que emiten muchas partículas submicrométricas. Tal como se discutió previamente, los limpiadores tipo Venturi, por condensación, y cargados son capaces de recolectar partículas submicrométricas a eficiencias mayores que otros limpiadores y, por lo tanto, pueden ser usados efectivamente en aplicaciones en donde existe un gran porcentaje de MP fina en la corriente de gas.²

La composición de la corriente de gas también puede ser un factor limitante en la aplicación de un limpiador para una industria específica, ya que los limpiadores en húmedo son muy susceptibles a la corrosión.¹ El uso de los limpiadores en húmedo también puede no ser deseable cuando se recolecta polvo valioso que puede ser reciclado o vendido. Puesto que los limpiadores descargan el polvo recolectado en forma de un sedimento húmedo, la reclamación de un polvo limpio y seco a partir de este lodo es con frecuencia inconveniente y costoso.¹ Debido a las restricciones de diseño, los limpiadores para particulados por lo general no son utilizados en instalaciones muy grandes, tales como las plantas de servicios públicos en donde las velocidades de flujo de gas exceden los 250 000 pies cúbicos estándares por minuto, puesto que se necesitan limpiadores múltiples una vez que las velocidades de flujo exceden los 60 000 - 75 000 pies cúbicos estándares por minuto.

La tabla 5.4-2 enumera las aplicaciones actuales de los limpiadores en húmedo.^{1,2,8} Debe notarse que el nivel del control de MP suministrado por cada uno de los tipos de limpiador enumerado en la tabla 5,4-2 variará de acuerdo al nivel de control requerido actualmente por cada industria y/o instalación. La fuerza impulsora para el control de la MP en muchas industrias y/o instalaciones son las regulaciones federales, estatales y locales sobre la contaminación del aire. A medida que se coloquen regulaciones más estrictas, con probabilidad ocurrirá un cambio hacia el uso de limpiadores con eficiencias más altas. La tabla 5.4-3 compara los diversos tipos de limpiadores de acuerdo a su potencial para controlar partículas finas.

Figure 5.4-13 Traducción de Términos

COMBUSTION DE CARBON Y ACEITE

COMBUSTIÓN DE MADERA Y CORTEZA

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)

Inserte grafica

Aceite Residual
Calidad de Datos: C, D

Inserte grafica

Combustión de Madera
y Corteza
Calidad de Datos: E

Caldera de Fondo Seco,
Carbón Bituminoso,
Calidad de Datos: C, D

Tamaño de las Partículas (μm)

Tamaño de las Partículas (μm)

PRODUCCIÓN DE COQUE

Eficiencia de Recolección Cumulativa (%)

Calidad de Datos: D
Inserte grafica

Colado del Coque
Absorbedor Móvil

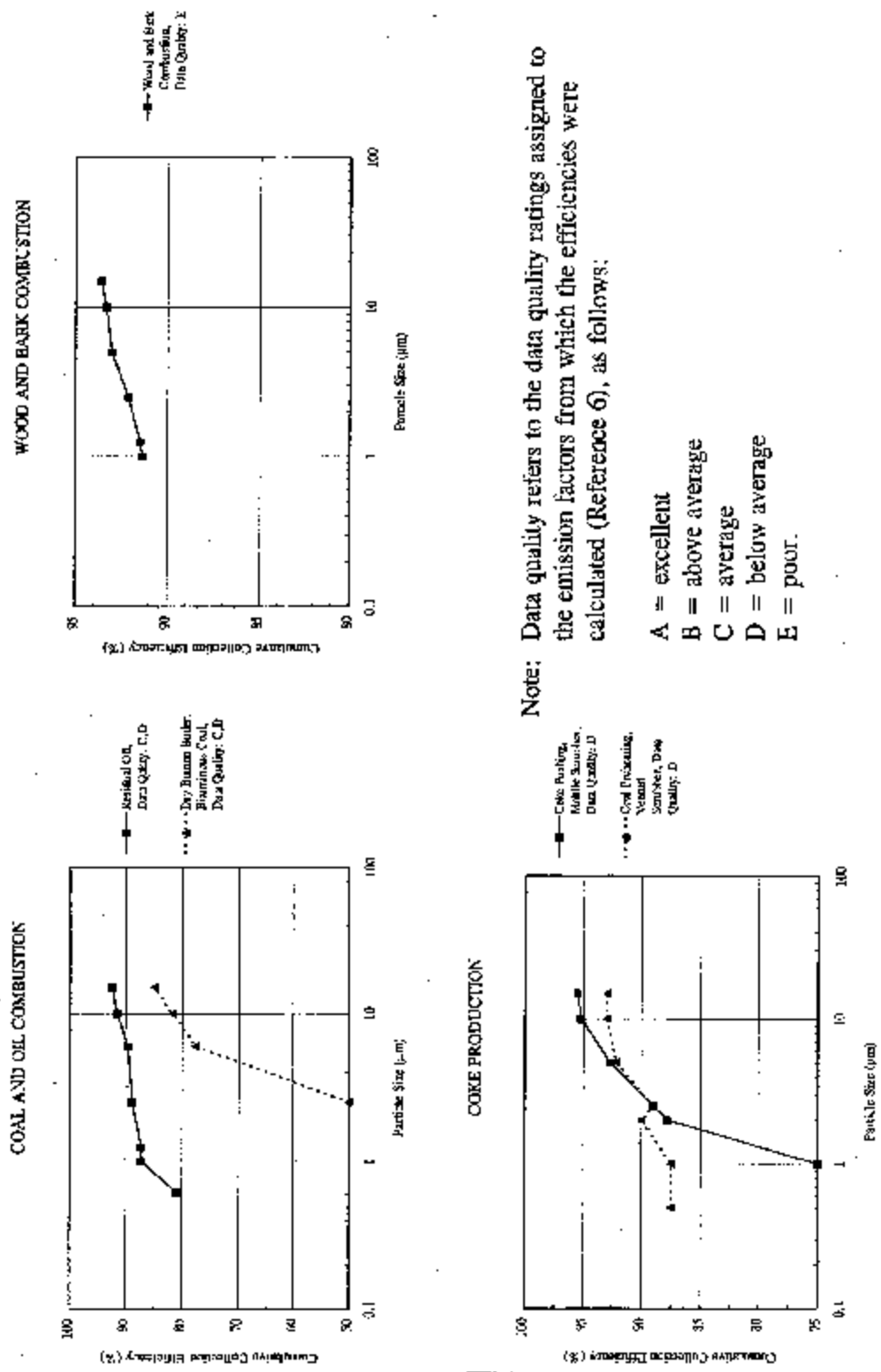
Pre calentado del Coque,
Absorbedor Tipo Venturi
Calidad de Datos: D

Tamaño de las Partículas (μm)

Nota 1: La calidad de datos se refiere a las clasificaciones asignadas a los factores de emisión a partir de los cuales se calcularon las eficiencias (Ref. 6), de la siguiente manera: A = excelente , B = por encima del promedio, C = promedio, D = por debajo del promedio, E = pobre

Figura 5.4-13. Datos de Eficiencia de Recolección Cumulativa para los Limpiadores en Húmedo para MP en Fuentes de Combustión de Carbón, Aceite, Madera y Corteza, y Operaciones de Producción de Coque (Referencia 6).

Nota 2: Para detalles de las gráficas vea la pagina siguiente



Note: Data quality refers to the data quality ratings assigned to the emission factors from which the efficiencies were calculated (Reference 6), as follows:

- A = excellent
- B = above average
- C = average
- D = below average
- E = poor.

Figure 5.4-13. Cumulative Collection Efficiency Data for PM Wet Scrubbers at Coal, Oil, Wood, and Bark Combustion Sources, and Coke Production Operations (Reference 6)

Tabla 5.4-1. Eficiencias de Recolección Cumulativas de MP-10 y MP-2.5 para los Limpiadores en Húmedo en Combustores de Carbón, Aceite y Corteza; y en Unidades de Producción de Coque (Referencia 6).

Aplicación	Eficiencia de Recolección (porcentaje)	
	MP-10	MP-2.5
Fuentes de Combustión		
Carbón bituminoso (fondo seco)	81.7	50.0
Aceite Residual	91.5	88.8
Madera y corteza	93.3	92.1
Corteza únicamente	85.1	83.8
Producción de Coque		

5.4.5 Costos de los Limpiadores en Húmedo para MP

Los costos de instalar y operar un ansorbedor incluyen los costos tanto de capital como anuales. Los costos de capital son todos los costos iniciales relacionados al equipo e instalación del limpiador. Los costos anuales son los costos directos anuales de la operación del limpiador más los costos indirectos tales como los gastos de mantenimiento, la recuperación de capital, los impuestos, la aseguranza y los cargos administrativos. Las secciones a continuación discuten los costos capitales y anuales para los limpiadores, referenciados al tercer trimestre de 1995 a menos que se anote lo contrario.

5.4.5.1 Costos de Capital

La inversión capital total (ICT) para los limpiadores, incluye todos los costos de capital, tanto directos como indirectos. Los costos de capital directos son los costos del equipo adquirido (CEA), y los costos de instalación (cimientos, sistema eléctrico, tubería, etc.). Los costos indirectos se relacionan a la instalación e incluyen la ingeniería, la construcción, los contratistas, el inicio de la obra, las pruebas y las contingencias. El CEA se calcula basándose en las especificaciones del limpiador, Los costos directos e indirectos de instalación se calculan como factores del CEA. La tabla 5.4-4 proporciona los factores de la ICT para un limpiador típico.^{9,10}

Tabla 5.4-2. Aplicaciones Industriales Actuales de los Limpiadores en Húmedo
(Referencias 1,2 y 8)

Aplicación	Código de Categoría de la Fuente	Tipo de Absorbedor Típico
Calderas de Servicios Públicos (Carbón, Aceite)	1-01-002...004	Venturi
Calderas Industriales (Carbón, Aceite, Madera, Residuos Líquidos)	1-02-001...005, -009, -011, -013	Venturi, placa de repercusión (traba)
Calderas Comerciales/Institucionales (Carbón, Aceite, Madera)	1-03-001...005 1-03-009	Venturi
Manufactura Química	3-01-001...999	Packed-bed, venturi, fiber-bed
Procesamiento de Materiales No Ferrosos (Primario y Secundario)		
Cobre	3-03-005 3-04-002	Cámara de Aspersión
Plomo	3-03-010 3-04-004	Venturi, cámara de aspersión (ciclónica) lecho de fibra, cargado
Aluminio	3-03-000...002 3-04-001	Cámara de aspersión, lecho embalado, Venturi, cargado
Otro	3-03-011...014 3-04-005...006 3-04-010...022	Cámara de aspersión (ciclónica)
Procesamiento de Materiales Ferrosos		
Producción de Coque	3-03-003...004	Cargado, Venturi, lecho embalado (móvil)
Producción de Ferroaleaciones	3-03-006...007	Lecho embalado, lecho de fibra

Aplicación	Código de Categoría de la Fuente	Tipo de Absorbedor Típico
Producción de Hierro y Acero	3-03-008...009	Venturi
Fundiciones de Hierro Gris	3-04-003	Venturi, placa de repercusión (traba)
Fundiciones de Acero	3-04-007, -009	Venturi
Manufactura de Asfalto	3-05-001...002	Venturi
Productos Minerales		
Limpieza del Coque	3-05-010	Venturi, lecho de fibra
Otro	3-05-003...999	Venturi
Madera, Pulpa y Papel	3-07-001	Venturi, cámara de aspersión (ciclónica)
Alimentos y Agricultura	3-02-001...999	Repercusión, lecho embalado, lecho de fibra
Incineración	5-01-001, 5-02-001, -005 5-03-001, -005	Venturi, lecho embalado, condensación

Los costos de un limpiador, en húmedo dependen del tipo de limpiador seleccionado, el tamaño de limpiador requerido y el material de construcción. La determinación del tamaño del limpiador incorpora varios parámetros de diseño, incluyendo la velocidad del gas, la relación de líquido a gas y la caída de presión. La velocidad del gas es el factor principal en la determinación del tamaño. El aumento de la velocidad del gas disminuirá el tamaño requerido y el costo de un limpiador. Sin embargo, la caída de presión aumentará con el aumento de la velocidad del gas. Esto también resultará en un aumento en el consumo de electricidad y, por lo tanto, costos de operación más altos. La determinación de la velocidad óptima del gas implica el balanceo de los costos de capital y anuales. En la mayoría de los casos, los limpiadores están diseñados para operar dentro de los rangos recomendados de velocidad de gas, relación de líquido a gas, y caída de presión. Estos rangos se proporcionan en la tabla 5.4-5.¹¹

Otro parámetro importante en los limpiadores que afecta el costo es la temperatura de la corriente de gas al punto de saturación una vez que ha sido enfriado por el líquido limpiador. Esta temperatura afecta la velocidad de flujo volumétrico del gas tratado y, en consecuencia, el tamaño del limpiador. Además, la temperatura de saturación impacta la constitución del líquido limpiador y la velocidad de flujo de las aguas residuales. La temperatura de saturación es una función compleja de tres variables esencialmente: la temperatura de la corriente de gas de entrada, la humedad absoluta de la corriente de gas de entrada, y la humedad absoluta al punto de saturación. Típicamente, la temperatura de saturación se determina gráficamente a partir de

Tabla 5.4-3. Potencial de Control de $MP_{10}/MP_{2.5}$
para Diversos Diseños de Limpiadores

Tipo de Absorbedor	$MP_{10}/MP_{2.5}$ Potencial de Control	Comentarios
Cámara de Aspersión	Regular	Los ciclónicos son mejores que los de aspersión convencional
Lecho Embalado	Deficiente	Es útil sólo para cargas bajas de polvo
Placa de Repercusión	Bueno	No es tan bueno para la $MP < 1 \mu m$
Ayuda Mecánica	Bueno	Un alto consumo de energía para lograr el control de $MP_{10}/MP_{2.5}$
Venturi	Bueno	Un alto consumo de energía para lograr el control de MP_{10}
Orificio	Bueno	No es tan bueno para la $MP < 2 \mu m$
Condensación	Bueno	Es posible un control excelente con limpiadores por condensación de “crecimiento”
Cargado	Excelente	Los costos de energía eléctrica se suman a los costos del absorbedor en general
Lecho de Fibra	Regular	Es útil sólo para la MP soluble

una gráfica sicométrica una vez que estas variables son conocidas. Para este documento, la determinación del tamaño y del costo de los limpiadores en húmedo fueron asistidas por el uso de las hojas de trabajo para el Costo del Control $CO\$T-AIR$, *CO\\$T-AIR Control Cost Spreadsheets*,¹² que emplean un proceso reiterativo para estimar la temperatura de saturación.

Una vez que un limpiador ha sido diseñado apropiadamente y su tamaño ha sido determinado, los costos pueden ser expresados por lo general como una función de la velocidad de flujo del gas de

entrada (contaminado) o de a velocidad total del gas.⁹ Las curvas de costo se muestran a continuación para los siguientes tipos de limpiadores: tipo Venturi, con placa de repercusión, y con torre repleta.

Todos los presupuestos para los costos de capital de los limpiadores han sido escalados a dólares (EE.UU.) del tercer trimestre de 1995. Sin embargo, los costos de capital presentados en esta sección pueden ser escalados aún más para reflejar valores más actuales a través del uso de los índices Vatavek de control de costos para la contaminación del aire, *Vatavuk Air Pollution Cost Control Indexes (VAPCCI)*, los cuales son actualizados trimestralmente, disponibles a través de la Red de Transferencia de Tecnología de la OAQPS, *OAQPS Technology Transfer Network (TTN)*, y publicados mensualmente en la revista *Chemical Engineering*. El VAPCCI actualiza el CEA y, puesto que los costos de capital se basan únicamente en el CEA, los costos de capital pueden ser ajustados fácilmente usando los VAPCCI. Para escalar los costos de capital de un año ($\text{Costo}_{\text{anterior}}$) a otro año más reciente ($\text{Costo}_{\text{nuevo}}$), se puede usar una proporción sencilla, tal como sigue:¹³

$$\text{Costo}_{\text{nuevo}} = \text{Costo}_{\text{anterior}} \left(\frac{\text{VAPCCI}_{\text{nuevo}}}{\text{VAPCCI}_{\text{anterior}}} \right)$$

El VAPCCI para los limpiadores en húmedo para el tercer trimestre de 1995 fue de 114.7.

Limpiadores Tipo Venturi: Los costos de los limpiadores, tipo Venturi se basan en datos para dos rangos de velocidades de flujo de gas. Las curvas de costo para los limpiadores que tratan menos de 19 000 pies cúbicos estándares por minuto se proporcionan en la figura 5.4-14. Las curvas de costo para los limpiadores tipo Venturi capaces de manejar por encima de 19 000 pies cúbicos estándares por minuto pero menos de 59 000 pies cúbicos estándares por minuto se muestran en la figura 5.4-15. Para velocidades de flujo totales mayores de 59 000 pies cúbicos estándares por minuto, la corriente de gas debe ser dividida uniformemente y tratada por dos o más limpiadores idénticos (con velocidades de flujo de entrada de < 59 000 pies cúbicos estándares por minuto) operando en paralelo.

El material de construcción más común para los limpiadores tipo Venturi es el acero carbonizado. Las aplicaciones especiales pueden requerir otros materiales, tales como el acero forrado de hule, el acero recubierto de epóxido, el plástico reforzado con fibra (PRF), que aumentarán el costo de la unidad.⁹ Se incluyen curvas de costo por separado para el acero carbonizado y otros materiales especializados en las figuras 5.4-14 y 5.4-15.¹²

Limpiadores con Placas de Repercusión: El costo de los limpiadores con placas de repercusión depende del número de placas y la velocidad de gas total. Los costos para los limpiadores, con placas de repercusión se basan en datos que corresponden a una velocidad de flujo de gas total entre 900 y 77 000 pies cúbicos estándares por minuto o superiores. Para velocidades de flujo de gas totales por encima de los 77 000 pies cúbicos estándares por minuto, se requieren limpiadores múltiples. La figura 5.4-16 presenta las curvas de costo para limpiadores con placa de repercusión con velocidades de flujo de gas totales entre 900 y 77 000 pies cúbicos estándares por minuto. Las curvas de costo para los

limpiadores con velocidades de flujo totales por encima de los 77 000 pies cúbicos estándares por minuto se muestran en la figura 5.4-17¹² y requieren el uso de 2, 3 o 4 unidades limpiadoras idénticas. Todas las correlaciones de costo mostradas aquí son para los limpiadores con placas tamizadoras con tres placas. Los limpiadores con placas de repercusión se construyen generalmente con acero carbonizado. Algunas aplicaciones pueden requerir materiales más costosos, tales como el acero carbonizado recubierto, el PRF, o el cloruro polivinílico (CPV).⁹

Limpiadores con Lecho Embalado: Los costos para los limpiadores con lecho embalado dependen de la relación de la velocidad de entrada del gas al diámetro de la columna, la orientación de la columna (vertical vs. horizontal), la altura del material de embalaje, y la presencia de cualquier equipo auxiliar. Las figuras 5.4-18 and 5.4-19 presentan las curvas de costo para dos tipos de limpiadores de lecho embalado. La figura 5.4-18 presenta una curva de costo para un limpiador con lecho embalado con una columna vertical pequeña. Los costos para esta unidad varían con el diámetro de la columna, que puede variar entre 1 y 2.5 pies. Las velocidades de flujo de gas varían entre 200 y 1 200 pies cúbicos estándares por minuto.⁹ Para la figura 5.4-18, se supone que el absorbedor está construido de PRF con 6 pies de embalaje de polipropileno. Los costos también incluyen los costos para una boquilla de aspersión, distribuidor de líquido y eliminador de neblina. La figura 5.4-19 proporciona una curva de costo para un limpiador con lecho embalado grande con flujo horizontal de gas de 800 a 80 000 pies cúbicos estándares por minuto. Los costos para esta unidad se basan en el uso de materiales de construcción de CPV o PRF y un diseño que incluye una sección de aspersión, un lecho embalado de 1 pie, y un eliminador de neblina.⁹ Los costos de capital y anuales también se encuentran a disposición en el capítulo 9 del manual para el Control de Costos de la OAQPS, *OAQPS Control Cost Manual*, (referencia 14).

5.4.5.2 Costos Anuales

El costo anual de un limpiador en húmedo se compone de costos directos e indirectos. Los costos anuales directos son los asociados con la operación y mantenimiento del absorbedor. Estos incluyen la mano de obra (de operación, supervisión, coordinación y mantenimiento), materiales para el mantenimiento, electricidad, desecho del sedimento residual, tratamiento de las aguas residuales, y agentes acondicionadores.¹² El calentamiento y el enfriamiento puede requerirse en ciertos climas para prevenir el congelamiento o la pérdida excesiva del líquido limpiador por evaporación.²

XXXXX

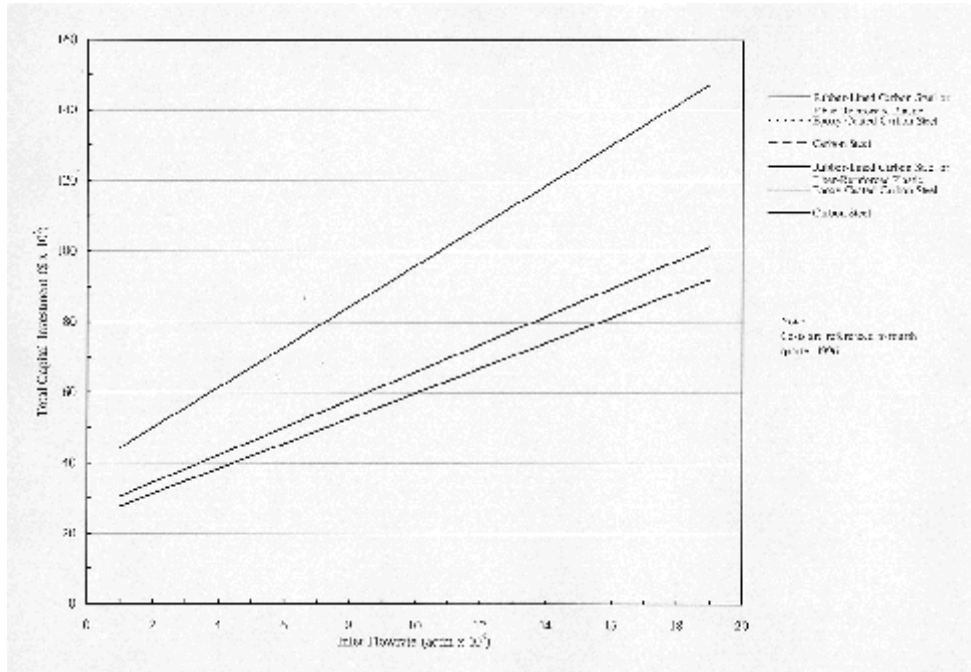


Figura 5.4-14. Costos de Capital para un Absorbedor Tipo Venturi, Velocidad de Flujo < 19,000 pies cúbicos estándares por minuto (Referencia 11)

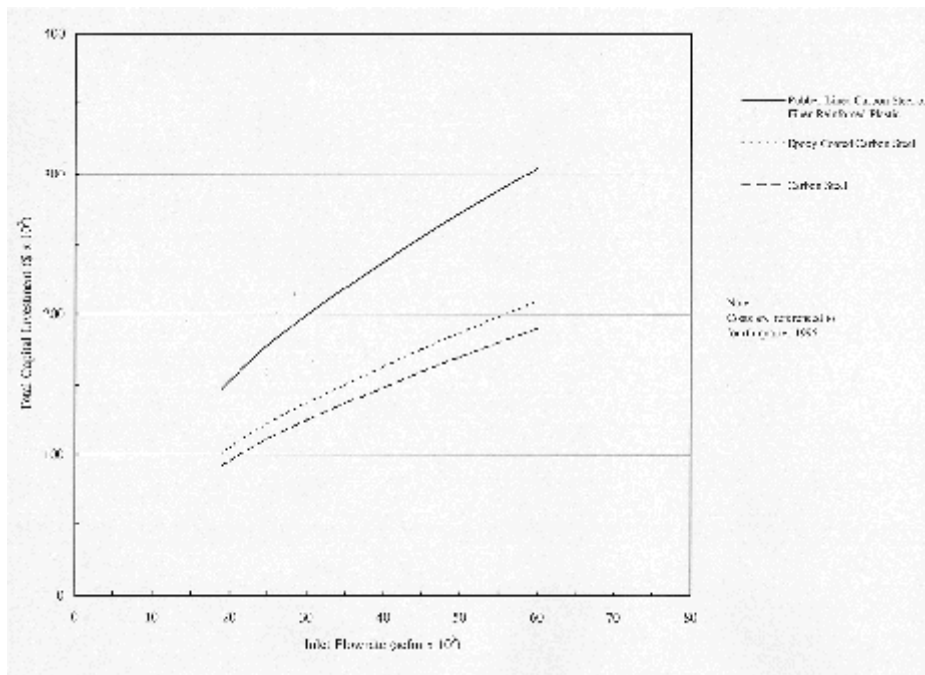


Figura 5.4-15. Costos de Capital para un Absorbedor Tipo Venturi, Velocidad de Flujo > 19 000 y < 59 000 pies cúbicos estándares por minuto (Referencia 11)

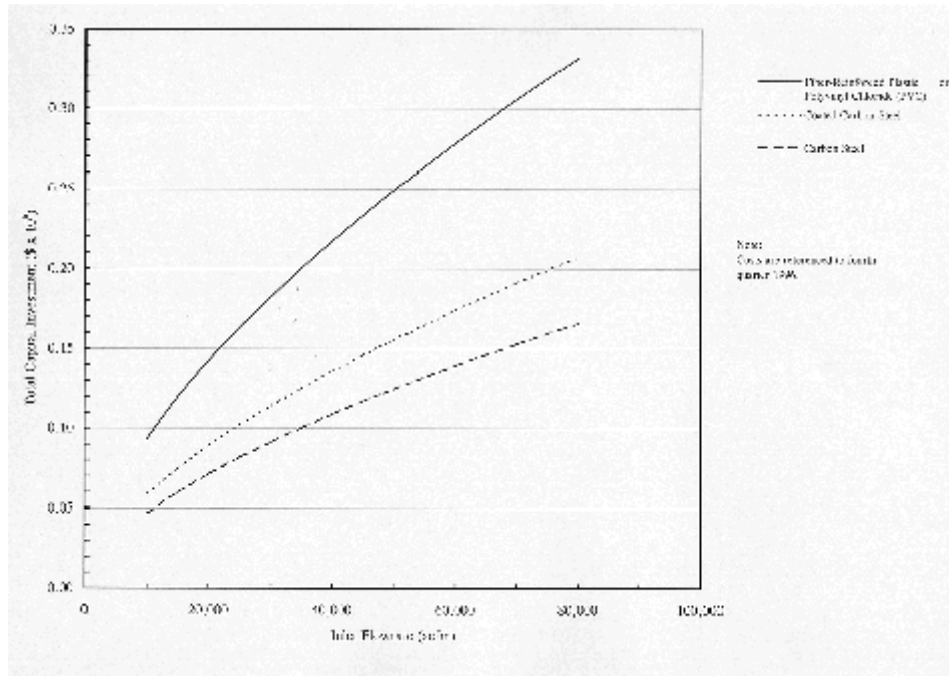


Figura 5.4-16. Costos de Capital para un Absorbedor con Placa de Repercusión, Velocidad de Flujo de Entrada < 7 000 pies cúbicos estándares por minuto (Referencia 11).

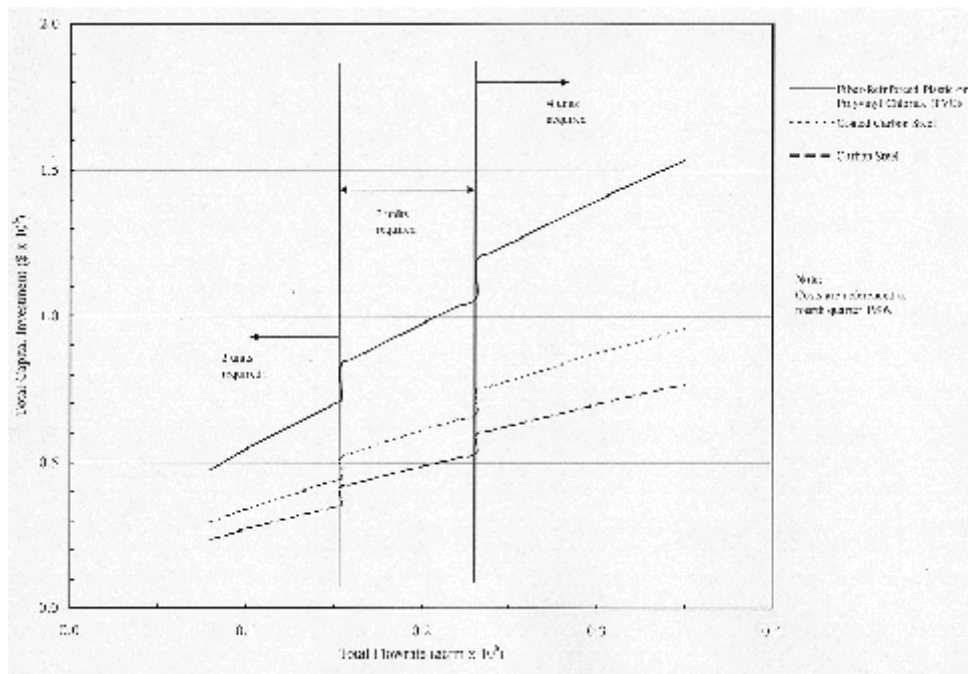


Figure 5.4-17. Costos de Capital para un Absorbedor con Depurador de Repercusión, Velocidad de Flujo de Entrada < 77 000 pies cúbicos estándares por minuto (Referencia 11).

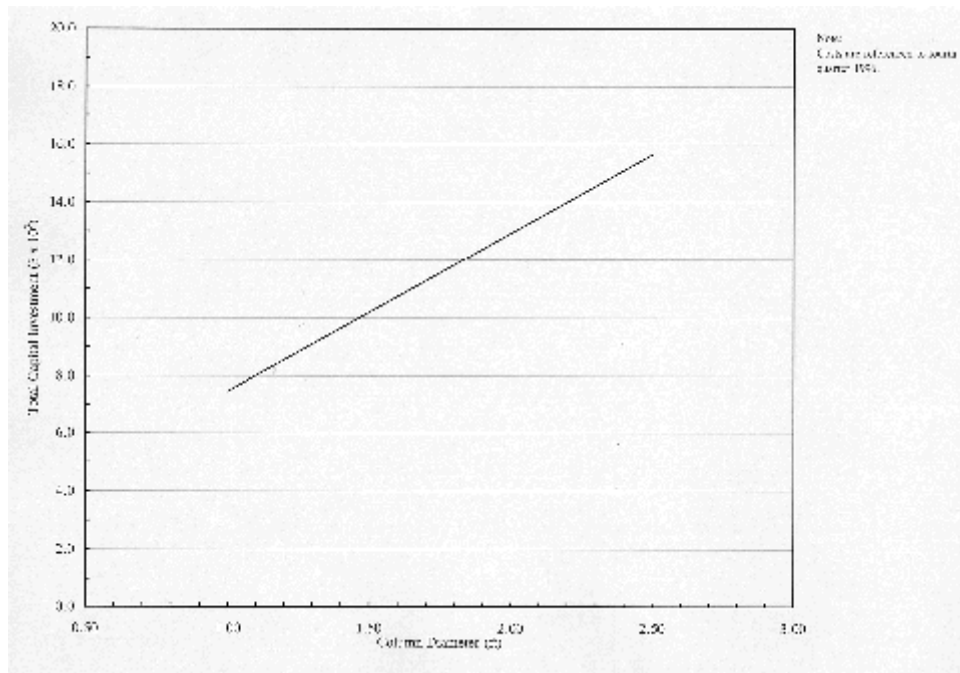


Figura 5.4-18. Costos de Capital para un Absorbedor con Lecho Embalado Vertical (Reference 9).

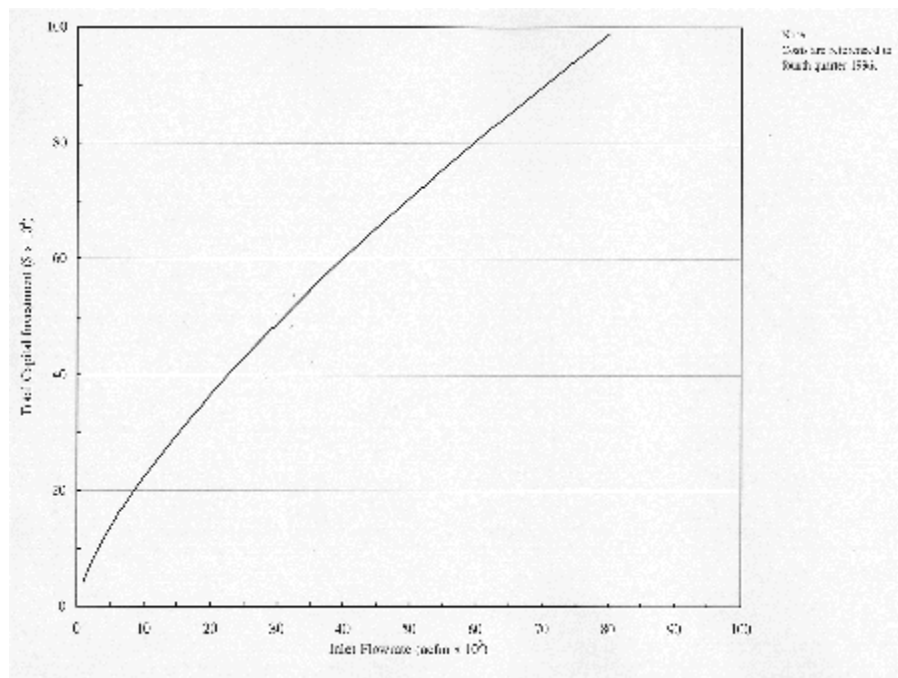


Figura 5.4-19. Costos de Capital para un Limpiador con Lecho Embalado Horizontal (Reference 9).

Los costos anuales indirectos incluyen impuestos, seguros, costos administrativos, gastos de mantenimiento y recuperación de capital. Todos estos costos excepto los gastos de mantenimiento dependen del ICT. La Tabla 5.4-6 enumera los parámetros que impactan los costos anuales de los limpiadores en húmedo con valores típicos proporcionados para cada parámetro. La Tabla 5.4-7 proporciona los factores de costo anual para los limpiadores. Los costos anuales son difíciles de generalizar porque estos costos son muy específicos del sitio

5.4.6 La Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios

Los impactos ambientales secundarios de la operación de los limpiadores en húmedo se relacionan al consumo de energía, la generación de residuos sólidos y la contaminación del agua. Las demandas de energía para los limpiadores en húmedo consisten por lo general de los requisitos de electricidad para la operación del ventilador, la operación de la bomba y el tratamiento de las aguas residuales. Los limpiadores cargados tienen demandas de energía adicionales para impartir la carga a las gotas de líquido y/o la MP. Las demandas de energía para el tratamiento de las aguas residuales y los limpiadores cargados son muy específicas del sitio y, por lo tanto, no se estiman aquí.²

La potencia del ventilador requerida para un limpiador puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:¹⁴

$$\text{Potencia del Ventilador (kilowatts-hora/año)} = 1.81 \times 10^{-4}(V)(P)(t) \quad (\text{Ecuación 5.4-1})$$

en donde V es la velocidad de flujo del gas en pies cúbicos estándares por minuto, P es la caída de presión en pulgadas de agua, t son las horas de operación por año, y 1.81×10^{-4} es un factor para la conversión de las unidades. Los costos de electricidad pueden ser determinados multiplicando el costo (en \$/kilowatt-hora) por la potencia del ventilador. Los requisitos de potencia de la bomba para los limpiadores en húmedo pueden ser determinados de la manera siguiente:¹⁴

$$\text{Potencia de la Bomba (kilowatts-hora/año)} = (0.746(Q_l)(Z)(S_g)(t))/(3,960 O) \quad (\text{Ecuación 5.4-2})$$

en donde Q_l es la velocidad de flujo del líquido (en galones por minuto), Z es la cabeza de fluido (en pies), S_g es la gravedad específica del líquido, t es el tiempo de operación anual (en horas por año), O , y 0.746 y $3,960$ son factores para la conversión de las unidades.

Los limpiadores en húmedo generan residuos en forma de sedimento lodoso. Esto crea la necesidad de operaciones de tratamiento de aguas residuales y desecho de residuos sólidos. Al inicio, el sedimento debe ser tratado para remover y limpiar el agua. Esta agua puede ser reutilizada o reciclada a continuación. Una vez que el agua ha sido removida, el residuo final se encontrará en forma de sólido o lodo. Si los residuos sólidos son inertes y no tóxicos, por lo general pueden ser depositados en un

relleno sanitario. Los residuos peligrosos tendrán requisitos más estrictos para su desecho. En algunos casos, los residuos sólidos pueden tener algún valor y pueden ser vendidos o re-procesados.²

Tabla 5.4-6. Parámetros de Costo Anual para los Absorbedores de Particulados (Referencia 12).

Parámetro	Descripción	Valores Típicos
Parámetros de Costo Directos		
Factor de Operación (FO)	Horas de operación del filtro de tela por año	8,640 horas/año
Salario de Mano de Obra del Operador (MOO)	Salario por la mano de obra del operador	\$12.50/hora ^a
Factor de Turno del Operador (TO)	Fracción del turno del operador en el filtro	0.25 ^b
Factor de Mano de Obra del Supervisor (MOS)	Fracción del costo de mano de obra del operador	0.15 ^b
Salario de Mano de Obra de Mantenimiento (MR)	Salario por mano de obra de mantenimiento	1.1 x FO ^b
Factor de Turno de Mantenimiento (TM)	Fracción del turno de mantenimiento en el filtro	0.25 ^b
Factor de Materiales para Mantenimiento (MM)	Fracción del costo de la mano de obra de mant.	1.0 ^b
Tarifa eléctrica (TE)	Costo de la electricidad	\$0.07/kW-hora ^a
Costo de las Sustancias Químicas (CQ)	Costo de las sustancias quím. acondicionadoras	\$/libra (Esp.Sitio)
Consumo de las Sustancias Químicas (VQ)	Velocidad del consumo de sustancias químicas	libra/hora (Esp.Sit.)
Tratamiento de las Aguas Residuales (TAR)	Costo del tratamiento del efluente del absorbedor	\$/galón (Esp.Sitio)
Procesamiento (P)	Velocidad del procesamiento de líquidos	galón/hora (Esp.Sit)
Fracción de Residuos (FR)	Fracción del procesamiento que es residuo	Específico al Sitio
Parámetros de Costo Indirectos		
Factor de Gasto de Mantenimiento (GM)	Fracción de los costos totales de mano de obra	0.60 ^b
Tarifa de Interés Anual (I)	Costo de oportunidad del capital	7 por ciento ^b
Vida de Operación (n)	Vida de operación anticipada del absorbedor	10 años ^b
Factor de Recuperación del Capital (FRC)	Función de (n) e (i)	0.1424 ^c
Impuestos (IMP)	Fracción de la ICT ^d	0.01 ^b
Aseguranza (SEG)	Fracción de la ICT ^d	0.01 ^b
Costos Administrativos (CA)	Fracción de la ICT ^d	0.02 ^b

^a Estimados para 1996 a partir de la información disponible en la actualidad.

^b Estimaciones a partir de las Hojas de Trabajo para el Costo del Control "CO\$T-AIR" (Referencia 12).

^c El Factor de Recuperación del Capital se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$FRC = \frac{I}{I + I^n} \div \{(1 + I)^n - 1\}, \text{ en donde } I = \text{tasa de interés (en fracción)} \text{ y } n = \text{vida de operación (en años).}$$

^d La inversión capital total (ICT) puede ser escalada a los valores actuales usando los Índices *Vatavuk* para el Costo del Control de la Contaminación del Aire, *Vatavuk Air Pollution Control Cost Indices (VAPCCI)*, descritos en la sección 5.4-5.

Tabla 5.4-7. Factores de Costo Anuales para los Absorbedores de Partículas (Referencia 11).

Artículo de Costo	Fórmula ^a	Factor
Costos Directos		
Mano de Obra		
Operador (MOO)	$(FO) \times (RO) \times (SO)$	A
Supervisor (MOS)	$(FS) \times (MOO)$	0.15 A
Mantenimiento (MOM)	$(FO) \times (FM) \times (SSM)$	1.1 A
Materiales para mantenimiento (MM)	$(FM) \times (MOM)$	1.1 A
Electricidad (E)	Potencia ^b × (FE)	E
Sustancias químicas (Q)	$(FO) \times (VQ) \times (CQ)$	Q
Tratamiento de Aguas Residuales (TA)	$(FO) \times (T) \times (FAR) \times (TAR)$	<u>AR</u>
Total Directo Costo Directo Total (CD)		3.35 A + E + Q + AR + D
Costos Indirectos		
Gastos de mantenimiento	$(GM) \times (MOO + MOS + MOM + MM)$	2.01 A
Recuperación del capital	$(FRC) \times (ICT)$	0.1424 ICT
Impuestos	$(IMP) \times (ICT)$	0.01 ICT
Aseguranza	$(ASE) \times (ICT)$	0.01 ICT
Costos administrativos	$(CA) \times (ICT)$	<u>0.02 ICT</u>
Costo Indirecto Total (IC)		2.01 A + 0.1824 ICT
Costo Anual Total (CD + CI)		<u>5.36 A + 0.1824 ICT + E + Q + AR + D</u>

^a Incluye valores descritos también en la tabla 5.4-6.

^b Igual a los requisitos de potencia totales, o sea, del ventilador, de la bomba, etc.

5.4.7 Referencias para la sección 5.4

1. Cooper, C.D and F.C. Alley. *Air Pollution Control: A Design Approach*. 2nd ed. Waveland Press, Prospect Heights, Illinois. 1994.
2. The Scrubber Manual (Revised). The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. January 1995.
3. Perry, R.H. and D.W. Green. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (6th Edition). McGraw-Hill Publishing Company, Inc. New York, New York. 1984.
4. Sun, J., B.Y.H Liu, P.H. McMurry, and S. Greenwood. A Method to Increase Control Efficiencies of Wet Scrubbers for Submicron Particles and Particulate Metals. *J. Air & Waste Management Association*. 44:2. February 1994.
5. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a, NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
6. Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). Volume I (Fifth Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.
7. Lerner, B.J. "Particulate Wet Scrubbing: The Efficiency Scam" in the Proceedings of the A&WMA Specialty Conference on "Particulate Matter; Health and Regulatory Issues (VIP-49)" held on April 4-6, 1995, in Pittsburgh, Pennsylvania. A&WMA, Pittsburgh, Pennsylvania. 1995.
8. Source Category Emission Reductions with Particulate Matter and Precursor Control Techniques. Prepared for K. Woodard, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina (AQSSD/IPSG), under Work Assignment II-16 (EPA Contract No. 68-03-0034), "Evaluation of Fine Particulate Matter Control." *September 30, 1996*.
9. Vatavuk, W.M. *Estimating Costs of Air Pollution Control*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan. 1990.
10. Vatavuk, W.M. and Neveril, R.B., Factors for Estimating Capital and Operating Costs, *Chemical Engineering*, November 3, 1980, pp. 157-162.

11. Schiffner, K.C. and H.E. Hesketh. *Wet Scrubbers: A Practical Handbook*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan. 1986.
12. Vatauk, W.M. "CO\$T-AIR" Control Cost Spreadsheets. Innovative Strategies and Economics Group, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.
13. Vatauk, W.M. Escalate Equipment Costs. *Chemical Engineering*. December 1995. pp. 88-95.
14. OAQPS Control Cost Manual (Fourth Edition, EPA 450/3-90-006). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January 1990.

5.5 INCINERADORES

Esta sección presenta los principios básicos de operación, diseños típicos, aplicación industrial, y costos de los incineradores usados como dispositivos de control. Un incinerador es el único dispositivo de control para materia particulada que no concentra a la materia particulada para su desecho a continuación. Un incinerador utiliza los principios de combustión para controlar a los contaminantes. Los incineradores usados como dispositivos de adición son, sin embargo, usados en rara vez para remover sólo materia particulada (MP); el control de la MP es generalmente deseable como un tratamiento secundario de una corriente de gas con un contenido alto de compuestos orgánicos volátiles (COV).¹ El tipo de MP que es generalmente controlado por un incinerador se compone comúnmente de hollín (partículas formadas como resultado de la combustión incompleta de hidrocarburos (HC), coque, o residuo de carbón. Existen dos tipos básicos de incineradores usados como dispositivos de adición: el termal y el catalítico. Para propósitos del control de la MP, el uso de un incinerador catalítico es limitado porque los catalizadores están sujetos a ser cegados por la MP.²

Existen varias ventajas en usar incineradores para las corrientes de aire residual que contienen COV y MP. Estas ventajas son: sencillez en su operación; capacidad de generación de vapor o recuperación del calor en otras formas; y capacidad para la destrucción virtualmente completa de los contaminantes orgánicos. Las desventajas incluyen: costos de operación relativamente altos (asociados particularmente con los requisitos de combustible); potencial para un peligro de incendio retroactivo y explosión a continuación; y combustión incompleta que posiblemente creara problemas de contaminación potencialmente peores.³ Por lo general se requieren altas razones de gas para los incineradores usados para el control de MP para prevenir el sedimento de la MP.⁵ Esto puede aumentar el tamaño de incinerador necesario para lograr el tiempo mínimo requerido de residencia del gas.

5.5.1 Mecanismos de Control del Incinerador

El control del incinerador está basado en el principio de que a una temperatura suficientemente alta y un tiempo de residencia adecuado, cualquier HC puede ser oxidado a bióxido de carbono (CO₂) y agua. En un incinerador, la MP que contiene HC primero se vaporiza en gas y después se oxida.¹

Para lograr la combustión completa, o sea, convertir todo el HC a CO₂ y agua, el incinerador debe proporcionar suficiente espacio, tiempo, turbulencia y temperatura lo suficientemente alta para encender los componentes. Las “tres T” de la combustión: tiempo, temperatura y turbulencia, gobiernan la velocidad y totalidad de la reacción de combustión. Para una combustión completa, el oxígeno debe ponerse en contacto próximo a la molécula combustible a una temperatura suficiente y durante un período de tiempo suficiente para que la reacción sea completa.²

El tiempo de combustión requerido para el control de la MP depende del tamaño y la composición de las partículas, el contenido de oxígeno del horno, la atmósfera, la temperatura del

horno, la velocidad del gas, y el grado de mezclado de los combustibles. Para la MP menor de 100 μm de diámetro, la velocidad de combustión se controla por medio de la cinética química; para la MP mayor de 100 μm , la difusión controla la velocidad de la combustión.¹ En los dispositivos de recolección (PES, filtros de tela, absorbentes) la difusión controla la velocidad de recolección de las partículas menores de 1 μm de diámetro.

Para las partículas menores de 100 μm el tiempo requerido para la combustión completa se puede calcular usando la ecuación siguiente:¹

$$t_c = (D d_p)/(2 K_s p_g) \tag{Ecuación 5.5-1}$$

en donde para el residuo de coque y carbón,

$$K_s = 8,710 \exp(-35,700/RT_s) \tag{Ecuación 5.5-2}$$

y para el hollín,

$$K_s = (1.085 \times 10^4 T_s^{-1/2}) (\exp(-39,300/RT_s)) \tag{Ecuación 5.5-3}$$

en donde t_c es el tiempo de combustión para una reacción controlada por cinética química (en segundos), D es la densidad de las partículas (en gramos por centímetro cúbico), d_p es el diámetro de las partículas (en centímetros), K_s es el coeficiente de velocidad de reacción en la superficie (en $\text{g}/\text{cm}^2\text{-sec-atm}$), p_g es la presión parcial de oxígeno en el aire de combustión (en atmósferas), R es la constante de la ley universal de gases ($82.06 \text{ atm-cm}^3/\text{mol-}^\circ\text{K}$), T_s es la temperatura de la superficie de la partícula (suponiendo que es igual a la temperatura del incinerador) en grados Kelvin ($^\circ\text{K}$).

Con el tiempo de residencia apropiado, la combustión completa debe resultar en un control >

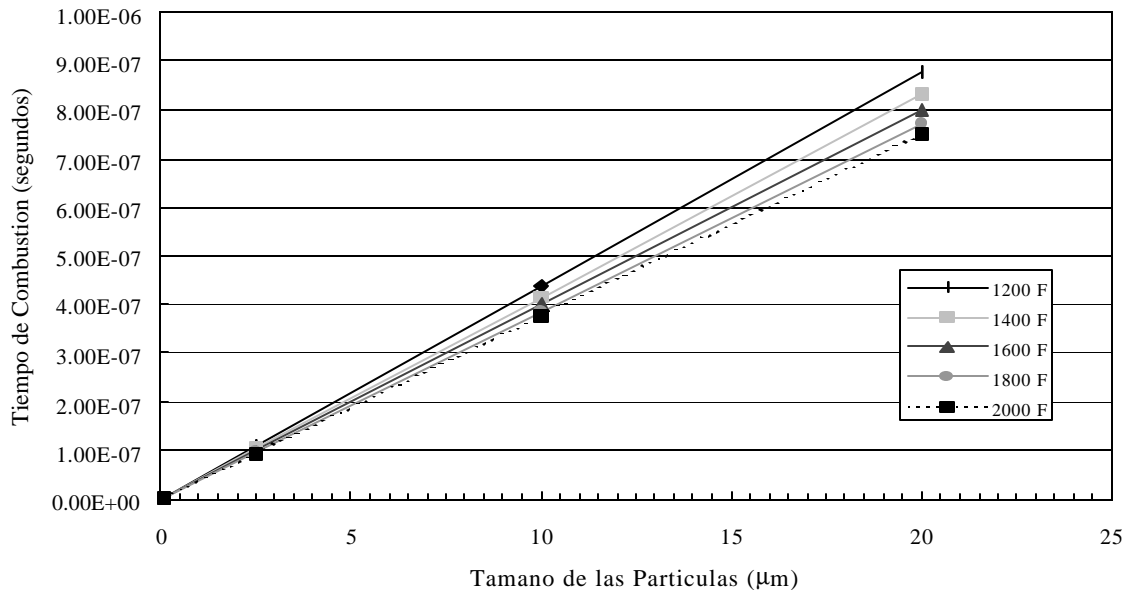


Figura 5.5-1. Tiempos de Residencia Teóricos Calculados para la MP de Coque de Diversos Tamaños en un Incinerador a Varias Temperaturas

99 por ciento de las partículas que contienen HC. La figura 5.5-1 muestra el tiempo de residencia que se necesita para un control > 99 por ciento de la MP de coque de diversos tamaños en un incinerador operado entre 1200 y 2000°F calculado usando las ecuaciones anteriores.¹

Aunque el tiempo de residencia y la temperatura del incinerador son los principales parámetros del incinerador que afectan el rendimiento del incinerador, otros parámetros importantes son el contenido de calor y el contenido de agua de la corriente de gas, y la cantidad en exceso del aire de combustión (o sea, la cantidad por encima de la cantidad estequiométrica necesaria para la combustión). La combustión de corrientes de gas con contenidos de calor menores de 50 Btu por pie cúbico estándar de aire generalmente requerirán combustible suplementario para mantener la temperatura de combustión deseada. También puede necesitarse combustible suplementario para la estabilidad de la flama, independientemente del contenido de calor del gas.⁴

Para incineradores operados por encima de 1400°F, las velocidades de reacción de la oxidación se vuelven bastante más rápidas que la velocidad del mezclado de gases por difusión. Como resultado, la reacción de combustión puede ser dificultada porque no hay suficientes moléculas de oxígeno en proximidad a los HC. Para asegurarse de que esto no ocurra. El mezclado debe ser mejorado por medio de aspas u otros métodos físicos.⁵

5.5.2 Tipos de Incineradores

Tal como se discutió anteriormente, existen dos tipos básicos de incineradores, los termales y los catalíticos. Ambos tipos de incineradores pueden usar intercambiadores de calor para recuperar algo de la energía calorífica proveniente del incinerador. Por lo tanto, esta sección discute ambos tipos tanto de incineradores como de intercambiadores de calor.

5.5.2.1 Incineradores Termales

Un incinerador termal típico es una cámara forrada con material refractario que contiene un quemador (o grupo de quemadores) en un extremo. Los incineradores termales usan gas natural típicamente el contenido calórico de la corriente de gas residual. En un incinerador termal, los gases combustibles residuales pasan por encima y alrededor de una llama de quemador hacia una cámara de residencia en donde enseguida se completa la oxidación de los gases residuales. Las indicaciones más recientes para los incineradores con el objeto de promover una destrucción más completa de COV son:⁵

- c Una temperatura de la cámara suficientemente alta para permitir que la reacción de oxidación prosiga rápidamente hasta su totalidad (1200-2000°F o mayor);
- c Velocidades de flujo de 20-40 pies por segundo, para promover el mezclado turbulento entre los productos de combustión calientes provenientes el quemador, el

aire de combustión y los componentes de la corriente residual; y

- c Un tiempo de residencia suficiente (aproximadamente 0.75 segundos o más) a la temperatura seleccionada para que la reacción de oxidación logre su fin

Las secciones a continuación discuten los dos tipos de incineradores termales: con quemador discreto y con quemador distribuido. Ambos tipos también pueden usar equipo para la recuperación del calor. Este equipo se discute en la sección 5.5.2.3 a continuación.

5.5.2.1.1 Incinerador Termal con Quemador Discreto. En un incinerador discreto (compuesto de partes distintas) con doble quemador, mostrado en la figura 5.5-2, la corriente de gas residual y el aire de combustión se introducen en una cámara de pre-mezclado equipada con un quemador discreto (auxiliar) de combustible. En esta cámara, ambos gases son completamente mezclados y precalentados por el quemador auxiliar. La mezcla de los gases calientes en reacción pasa enseguida hacia dentro de la cámara principal de combustión en donde se localiza otro quemador (primario). El tamaño de la cámara se ajusta para permitirle a la mezcla el tiempo suficiente a temperatura elevada para que la reacción de combustión llegue a completarse. A continuación, la energía puede ser recuperada en una sección de recuperación del calor de los gases calientes de escape.⁶

5.5.2.1.2 Incinerador Termal con Quemador Distribuido. Los incineradores termales (que usan gas natural como el combustible supletorio) también pueden usar un quemador de gas tipo rejilla, o distribuido. Este quemador de gas se muestra en la figura 5.5-3. En un incinerador termal distribuido, pequeños chorros de llama de gas en una superficie de rejilla encienden los vapores en el gas a medida que pasa a través de la rejilla. La rejilla actúa como una traba para promover el mezclado antes de que el gas entre a la segunda parte de la cámara del incinerador. Debido a que existen muchas llamas pequeñas distribuidas sobre toda la sección transversal de la cámara de combustión y que los vapores están bien mezclados, este arreglo permite que los vapores de gas se quemen a una temperatura menor de la cámara y permite un menor uso de combustible que la configuración discreta de quemadores, descrita anteriormente.⁴ En el quemador discreto, es más probable que los vapores y las partículas sobrevivan a la gran flama inicialmente, así que la cámara debe ser mantenida a una temperatura más alta para asegurar la combustión completa.

5.5.2.2 Incineradores Catalíticos

Generalmente no se recomienda un incinerador catalítico para MP puesto que la MP, a menos que sea removida previo a la incineración, con frecuencia recubrirá al catalizador de manera que se evita que los sitios activos del catalizador ayuden en la oxidación de los contaminantes en la corriente de gas. Este efecto de la MP sobre el catalizador es llamado cegado (*blinding*).² A pesar de esta desventaja, los incineradores catalíticos son usados a veces para el control de la MP en la industrias textil y la manufactura química, y para fuentes de combustión tales como los motores de combustión

interna, las calderas y los secadores.⁷ Por lo tanto, se incluye aquí una breve descripción de este tipo de incinerador.

Los incineradores catalíticos son muy parecidos a la oxidación termal, con la diferencia primaria de que el gas, después de pasar a través de la zona del gas, pasa a través de un lecho de catalizador.⁵ El catalizador tiene el efecto de aumentar la velocidad de reacción de la combustión, permitiendo la conversión a temperaturas de reacción más bajas que en las unidades incineradoras termales. Por lo tanto, los catalizadores también reducen el volumen/tamaño del incinerador.⁵ Los catalizadores usados típicamente para la incineración de COV incluyen el platino y el paladio. Otras formulaciones incluyen los óxidos metálicos, los cuales son utilizados para las corrientes de gas que

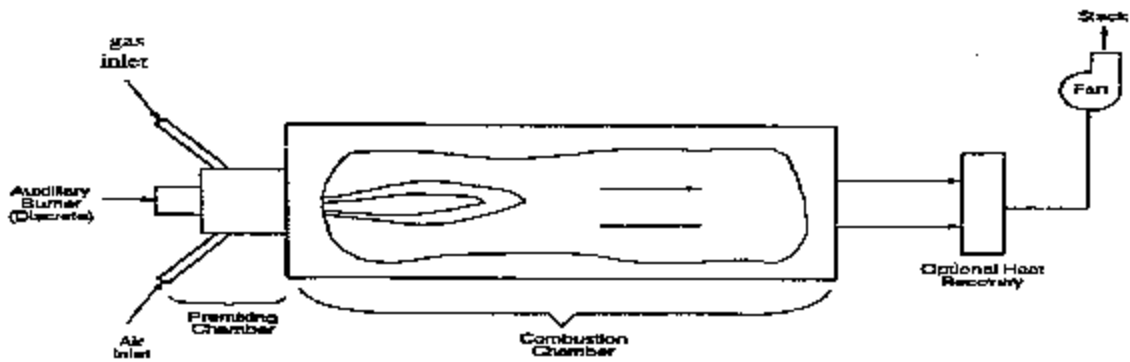


Figure 5.5-2. Schematic Diagram of a Discrete Burner Thermal Incinerator (Reference 4).

contienen compuestos clarinados.⁴

Traducción de los Términos de la Figura 5.5-2

Auxiliary Burner = Quemador Auxiliar (Discreto)	Gas Inlet = Entrada del Gas
Premixing Chamber = Cámara de Premezclado	Air Inlet = Entrada del Gas
Combustión Chamber = Cámara de Combustión	Fan = Ventilador
Optional Heat Recovery = Recuperación Opcional del Calor	Stack = Tubo de Chimenea

Figura 5.5-2. Diagrama Esquemático de un Incinerador Termal con Quemador Discreto (Referencia 4).

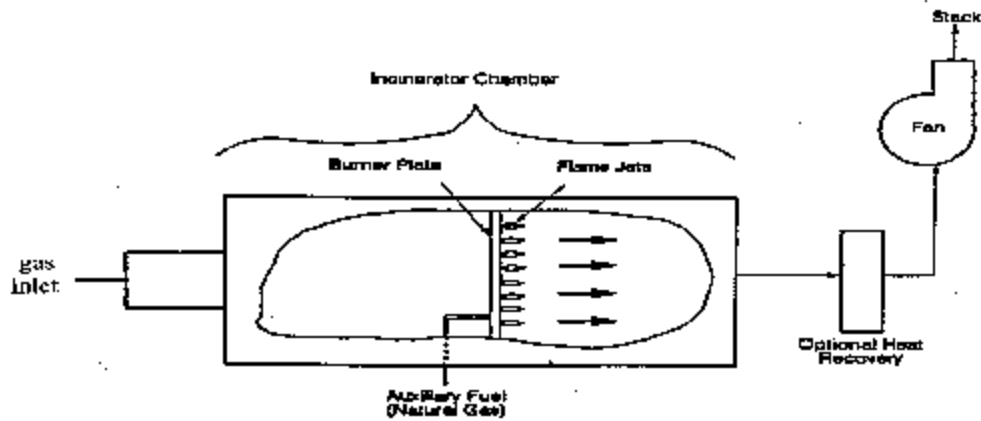


Figure 5.5-3. Schematic Diagram of a Distributed Burner Thermal Incinerator (Reference 6).

Figura 5.5-3. Diagrama Esquemático de un Incinerador Termal con Quemador Distribuido (Referencia 6).
Traducción de los Términos de la Figura 5.5-3

Auxiliary Fuel (Natural Gas)= Combustible Auxiliar (Gas Natural)	Gas Inlet = Entrada del Gas
Incinerator Chamber = Cámara del Incinerador	Fan = Ventilador
Burner Plate = Placa del Quemador	Flame Jets = Chorros de Llama
Optional Heat Recovery = Recuperación Opcional del Calor	Stack = Tubo de Chimenea

Se presenta un esquema de un incinerador catalítico en la figura 5.5-4.⁴ En un incinerador catalítico, la corriente de gas es introducida dentro de una cámara de mezclado en donde también es calentada. El gas residual generalmente pasa a través de un intercambiador recuperativo de calor (discutido a continuación), en donde es precalentado por el gas después de la combustión.¹¹ El gas calentado pasa enseguida a través del lecho catalizador. El oxígeno y los COV emigran hacia la superficie del catalizador por difusión de gases y son adsorbidos dentro de los sitios activos del catalizador sobre la superficie del catalizador en donde entonces ocurre la oxidación. A continuación, los productos de la reacción de oxidación son des-adsorbidos de los sitios activos por el gas y transferidos de vuelta dentro de la corriente gas por difusión.⁸

Tal como se discutió anteriormente, la MP puede cegar los poros de los catalizadores rápidamente y desactivar al catalizador con el paso del tiempo. Debido a que esencialmente toda la

superficie activa del catalizador se encuentra contenida en poros relativamente pequeños, la MP no necesita ser grande para cegar al catalizador. No existen especificaciones generales respecto a la concentración y el tamaño de la MP que pueden ser tolerados por los catalizadores porque el tamaño y el volumen de los poros de los catalizadores varían mucho.⁹ Esta información con probabilidad estará a disposición por parte de los fabricantes de catalizadores.

Las ventajas de los reactores de combustión catalítica sobre los incineradores termales, por lo tanto, incluyen:⁵

- C Menores requisitos de combustible,
- C Temperaturas de operación más bajas,
- C Poco o ningún requisito de mantenimiento,
- C Reducción del peligro de incendio, y
- C Reducción de los problemas de incendio retroactivo.

Las desventajas incluyen:⁵

- C Costos de capital más altos,
- C El cegado del catalizador causa problemas operacionales y/o requisitos de mantenimiento más altos (costos anuales),
- C Se pudiera necesitar la pre-recolección de la MP, y
- C El catalizador agotado que no pueda ser regenerado pudiera necesitar desecharse.

5.5.2.3 Equipo de Recuperación de Calor

Puesto que el gas del tubo de escape todavía está caliente después de salir del incinerador, el calor puede ser recuperado con el equipo auxiliar de incinerador adecuado. El equipo para la recuperación del calor para un incinerador puede ser recuperativo o re-generativo. Los intercambiadores de calor recuperativos, que recuperan el calor en una base continua, incluyen a los intercambiadores de calor con flujo a corriente transversa, a contracorriente y con la corriente. Para un flujo de calor y una caída de temperatura determinados, los requisitos de superficie para un intercambiador de calor serán los más bajos en una configuración con flujo a contracorriente.

Los intercambiadores de calor re-generativos recuperan el calor mediante el intercambio intermitente de calor alternando entre el calentamiento y el enfriamiento de un sólido. El calor fluye alternadamente hacia dentro y fuera del mismo intercambiador a medida que la dirección de los flujos de aire y de escape de gas son invertidos periódicamente. El resumidero de calor y la zona de transferencia de calor para los intercambiadores de calor re-generativos pueden ser ya sea un lecho fijo, un lecho en movimiento o un cilindro rotatorio.¹

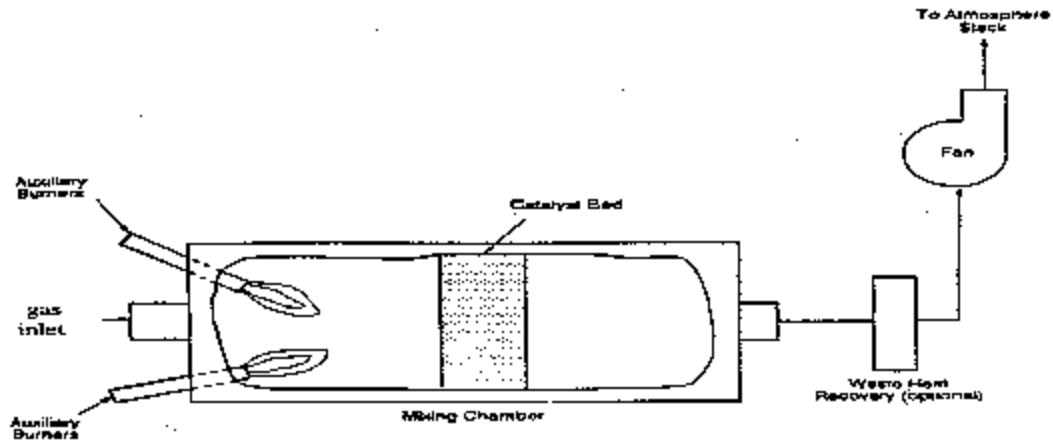


Figure 5.5-4. Schematic Diagram of a Catalytic Incinerator (Reference 4).

Figura 5.5-4 Diagrama Esquemático de un Incinerador Catalítico

Traducción de los Términos de la Figura 5.5-4

Auxiliary Burners = Quemadores Auxiliares

Mixing Chamber = Cámara Mezcladora

To Atmosphere = Hacia la atmósfera

Waste Heat Recovery (Optional) = Recuperación del Calor (Opcional)

Gas Inlet = Entrada del Gas

Fan = Ventilador

Catalyst Bed = Lecho de Catalizador

Stack = Tubo de Chimenea

5.5.3 Eficiencia de Control

5.5.3.1 Eficiencia de Control para los Compuestos Orgánicos Volátiles

Teóricamente, todo el material orgánico, incluyendo a los COV, son combustibles con la eficiencia de combustión limitada únicamente por el costo. En base a estudios de la eficiencia de los incineradores termales, se ha concluido que se puede lograr al menos un 98 por ciento (o una concentración de salida de 20 partes por millón por volumen, ppmv) de destrucción de COV por todos los incineradores bien diseñados. Se predice una estimación de una eficiencia del 98 por ciento para los incineradores termales que operan a 1,400°F o más, con al menos 0.75 segundos de residencia.⁵ Si un incinerador termal es diseñado y operado apropiadamente para producir las condiciones óptimas en la cámara e combustión, debe ser capaz de alcanzar eficiencias de destrucción mayores del 99 por ciento para los COV halogenados, cuando la concentración de COV en la corriente de gas se encuentre por encima de aproximadamente 2,000 ppmv.⁶

5.5.3.2 Eficiencia de Control de Materia Particulada

Las emisiones controladas y/o los datos de pruebas de eficiencia para la MP en incineradores por lo general no se encuentran disponibles en la literatura. Sin embargo, se encontraron disponibles los factores de emisión para MP en procesos de anhídrido ftálico con incineradores.¹⁰ Las eficiencias de control de MP para estos procesos fueron calculadas a partir de los factores de emisión reportados y se muestran en la Tabla 5.5-1. Las eficiencias de control de MP variaron dentro de un rango de 79 a 96 por ciento de control para la MP total.

En el inventario nacional, *National Inventory*, de la EPA en 1990, los incineradores fueron usados como dispositivos de control para MP para lograr del 25 al 99.9 por ciento de control de MP₁₀ en instalaciones de fuente de punto. El control de COV reportado para estos dispositivos varió dentro de un rango del 0 al 99.9 por ciento. Estos rangos de eficiencias de control son grandes porque incluyen a las instalaciones que no tienen emisiones de COV y sólo controlan MP (estas instalaciones reportarían una eficiencia de 0 por ciento para el control de COV), así como las instalaciones que tienen emisiones de MP bajas y se preocupan principalmente del control de COV.

5.5.4 Aplicabilidad

Aunque los incineradores pueden ser usados con cualquier material orgánico, su aplicación se limita a un rango de concentraciones de vapor de gas. Para prevenir explosiones, la concentración de vapor debe estar sustancialmente por debajo del nivel inflamable inferior del gas (límite explosivo inferior, *lower explosive limit [LEL]*). Como regla, se emplea un factor de 4 para dar un margen de seguridad.² Por lo tanto, es poco probable que se usen incineradores para procesos con un contenido muy alto de COV. La presencia de halógenos también requiere equipo adicional tal como absorbedores para la eliminación de gas ácido.⁴

Los incineradores termales pueden ser diseñados para manejar fluctuaciones menores en la razón de flujo. Sin embargo, los procesos con el potencial de fluctuaciones excesivas en la razón de flujo (o sea, perturbaciones al proceso) podrían no ser apropiados para el uso de incineradores, puesto que la eficiencia de control pudiera disminuir fuera del rango aceptable.⁴ Los hornos de centella (*flares*) pueden ser un control apropiado para procesos con un potencial de fluctuación excesivo. La Tabla 5.5-2 presenta las condiciones de operación requeridas para un rendimiento satisfactorio del incinerador en varias aplicaciones industriales.³ Nótese que el tiempo de residencia y la temperatura del incinerador requeridos para el control de MP son

Tabla 5.5-1 Eficiencias de Control de MP para Incineradores Termales en Procesos de Manufactura de Anhídrido Ftálico (Referencia 10)

Unidad de Proceso	Factor de Emisión de MP (libras de MP por tonelada de producto)		Eficiencia de Control Calculada (por ciento)
	No Controlada	Controlada	
Procesamiento de o-Xileno			
Oxidación	138	7	95
Pretratamiento	13	0.7	95
Destilación	89	4	96
Procesamiento de Naftaleno			
Oxidación	56	11	80
Pretratamiento	5	1	80
Destilación	38	8	79

mucho más altos que los requeridos para las fuentes que no emiten MP. Un examen del inventario nacional de la EPA en 1990,⁷ mostró que las categorías de fuentes primarias en las cuales se usaron incineradores para el control de la MP fueron:

- C Producción de Petróleo y Coque
- C Manufactura de Sustancias Químicas y Productos Aliados
- C Industrias Metalúrgicas Primarias
- C Equipo Electrónico y Otros Eléctricos

Estas categorías de fuentes fueron identificadas a partir de los datos reportados en el inventario nacional de 1990,⁷ y corresponde a instalaciones que reportaron eficiencias de control de PM₁₀ para incineradores con probabilidad de haber sido usados como dispositivos primarios de control.

Tabla 5.5-2 Requisitos Operacionales de Rendimiento Satisfactorio para Diversas Aplicaciones y Niveles de Control Industriales (Referencia 3)

Aplicación	Nivel de Control (por ciento)	Tiempo de Residencia (segundos)	Temperatura (°F)
Control de HC	>90	0.3-0.5	1100-1250 ^a
HC + CO	>90	0.3-0.5	1250-1500
Olor			
Control Bajo	50-90	0.3-0.5	1000-1200
Control Mediano	90-99	0.3-0.5	1100-1300
Control Alto	>99	0.3-0.5	1200-1500
Humos / Plumas			
Humo Blanco (neblina líquida)	>99	0.3-0.5	800-1000 ^b
HC y CO	>90	0.3-0.5	1250-1500
Humo Negro (hollín y otra MP combustible)	>99	0.7-1.0	1400-2000

^a Pueden requerirse temperaturas de 1400 a 1500°F si existe una cantidad significativa de cualquiera de los siguientes: metano, *cellosolve*, y aromáticos sustituidos (por ejemplo, tolueno y xilenos).

^b La operación únicamente para la reducción de la pluma no es recomendada, puesto que esto apenas convierte una emisión visible de hidrocarburos en una invisible y con frecuencia crea un nuevo problema de olor debido a una oxidación parcial en el incinerador.

5.5.5 Costos de Incineradores

Los costos de instalar y operar un incinerador incluyen los costos tanto de capital como anuales. Los costos de capital son todos los costos iniciales del incinerador relacionados con el equipo. Los costos anuales son los costos directos para operar y mantener el incinerador durante un año, además de costos indirectos tales como los gastos de mantenimiento; la recuperación del capital; y los impuestos,

el seguro y los cargos administrativos. Las secciones siguientes discuten los costos de capital y anuales para los incineradores, referidos al cuarto trimestre de 1996, a menos que se indique lo contrario.

Los incineradores diseñados para el control de la MP tienen una gran probabilidad de tener costos más altos que los incineradores diseñados para el control de COV, porque se necesitan temperaturas más altas y tiempos de residencia más largos para la destrucción de la MP (véase la Tabla 5.5-2). Los incineradores diseñados para el control de la MP también tienen una mayor probabilidad de necesitar más combustible suplementario para mantener las temperaturas más altas y las cámaras de combustión más grandes para alcanzar los tiempos de residencia más largos. Puesto que los datos de costo de los incineradores presentados a continuación probablemente fueron derivados para los incineradores diseñados únicamente para el control de COV, los costos reales para los incineradores diseñados para el control de la MP con mayor probabilidad serán más altos.

El uso de un incinerador catalítico para el control de la MP es limitado porque los catalizadores están sujetos al envenenamiento/cegado por la MP;² en consecuencia, sólo los costos de los incineradores termales se discuten en esta sección. Para información sobre los costos de los incineradores catalíticos, consúltense las referencias “Estimando los Costos del Control de la Contaminación del Aire”, *Estimating Costs of Air Pollution Control*¹¹ y las Hojas de Trabajo para el Control de Costos “Cost-Air”, “*CO\$T-AIR*” *Control Cost Spreadsheets* de la EPA.¹²

5.5.5.1 Costos de Capital

La inversión de capital total (ICT) para los incineradores incluyen todos los costos de capital iniciales, tanto directos como indirectos. Los costos de capital directos son los costos del equipo adquirido (CEA) y los costos de instalación (cimientos, sistema eléctrico, tubería, etc.). Los costos indirectos se relacionan con la instalación e incluyen la ingeniería, la construcción, los contratistas, el inicio de la obra, las pruebas y las contingencias. El CEA se calcula basándose en las especificaciones del incinerador. Los costos de instalación directos e indirectos se calculan como factores del CEA.¹¹ El costo del equipo presentado en la Tabla 5.5-3 se refiere a los factores de costo para los incineradores fabricados a medida (no unidades embaladas).

La razón de flujo del gas y el requisito de combustible auxiliar son los parámetros principales para la determinación del tamaño para un incinerador. Este primero determina el tamaño y el costo del equipo, mientras que el último comprende la mayoría de los costos de operación y mantenimiento anuales. Estos parámetros son inter-dependientes, basándose en los balances de material y energía tomados alrededor del incinerador.⁹

La figura 5.5-5 muestra la inversión de capital total V.S. la razón de flujo (tamaño) para un incinerador termal con equipo para la recuperación recuperativa del calor.¹² En la figura 5.5-5 se muestran tres niveles de recuperación de calor: 0 por ciento, 35 por ciento, y 50 por ciento. Para los propósitos de la figura, se supuso que el incinerador termal operaba a una temperatura de combustión

de 1600°F y que el gas residual poseía un contenido de calor de Btu/pie cúbico estándar. La curva ilustra dos fenómenos: 1) la proporcionalidad directa del costo de capital a la razón de flujo (tamaño), y 2) la proporcionalidad del costo de capital a la eficiencia de recuperación del calor. Esto es, los costos de capital aumentan con el aumento de ambos la razón de flujo (tamaño) y el aumento de la eficiencia de recuperación del calor.

La figura 5.5-6 muestra la inversión capital total V.S. la razón de flujo (tamaño) para incineradores termales con sistemas de recuperación regenerativa de calor del 85 por ciento y 95 por ciento.¹² Tal como en la figura anterior, se supuso que el incinerador termal operaba a una temperatura de combustión a 1700°F y que el gas residual poseía un contenido de calor de 4 Btu/pies cúbicos estándar. También, tal como en la figura anterior, los costos de capital para los incineradores con sistemas de recuperación regenerativa de calor aumentan con el aumento de la razón de flujo (tamaño) y disminuyen con el aumento de la eficiencia de la recuperación de calor.

Una comparación entre el costo capital de los incineradores con sistemas recuperativos V.S. regenerativos para la recuperación de calor demuestra que para el mismo tamaño es mayor del doble de la inversión capital requerida para un incinerador con un sistema de recuperación recuperativa de calor.

5.5.5.2 Costos Anuales

El costo total anual de un incinerador se compone de costos tanto directos como indirectos. Los costos anuales directos son aquéllos asociados con la operación y el mantenimiento del incinerador. Estos incluyen la mano de obra (operadora, supervisora, coordinadora y de mantenimiento); los materiales para mantenimiento; los materiales de operación; la electricidad; y el combustible suplementario, si éste se aplica.

Table 5.5-3 Factores del Costo de Capital para los Incineradores Termales
(de la Referencia 11)

Artículo de Costo	Factor
Costos Directos	
Costos de equipo adquirido	
Incinerador + equipo auxiliar	Tal como fue estimado (A)
Instrumentación	0.10 A
Impuestos sobre la venta	0.03 A
Transporte	<u>0.05 A</u>
Costo Total del Equipo Adquirido (CEA)	B = 1.18 A
Costos Indirectos de Instalación	
Cimientos y soportes	0.08 B
Manejo y erección	0.14 B
Sistema Eléctrico	0.04 B
Tubería	0.02 B
Insulación para tubería	0.01 B
Pintura	<u>0.01 B</u>
Costo de Instalacion Directo Total	0.30 B
	Tal como fue requerido
Preparación del Sitio y de los Edificios	(Sitio)
Costo Directo Total, CD	1.30 B + Sitio
Costos Indirectos (instalación)	
Ingeniería	0.10 B
Gasto de construcción y de campo	0.05 B
Honorarios de Contratistas	0.10 B
Inicio de la Obra	0.02 B
Prueba de Rendimiento	0.01 B
Contingencias	<u>0.03 B</u>
Costo Indirecto Total (CI)	0.31 B
Inversión Capital Total = CD + CI	1.61 B + Sitio

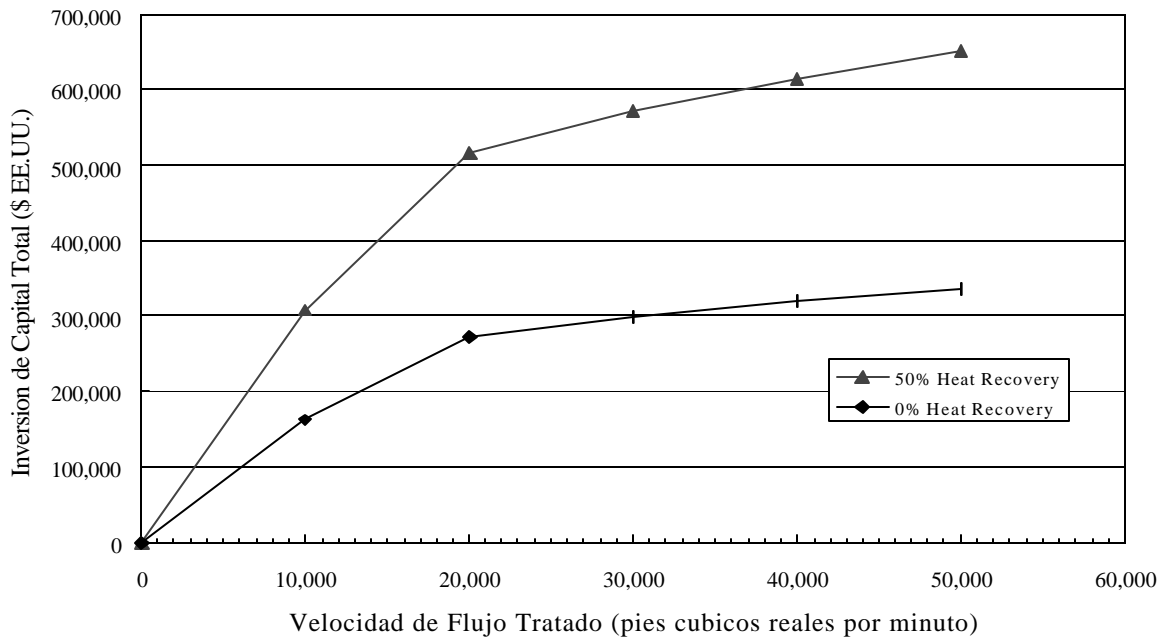


Figura 5.5-5. Inversión de Capital Total vs. Razón de Flujo para un Incinerador Termal con 0, 35 y 50 Por Ciento de Recuperación Recuperativa de Calor (Referencia 12).

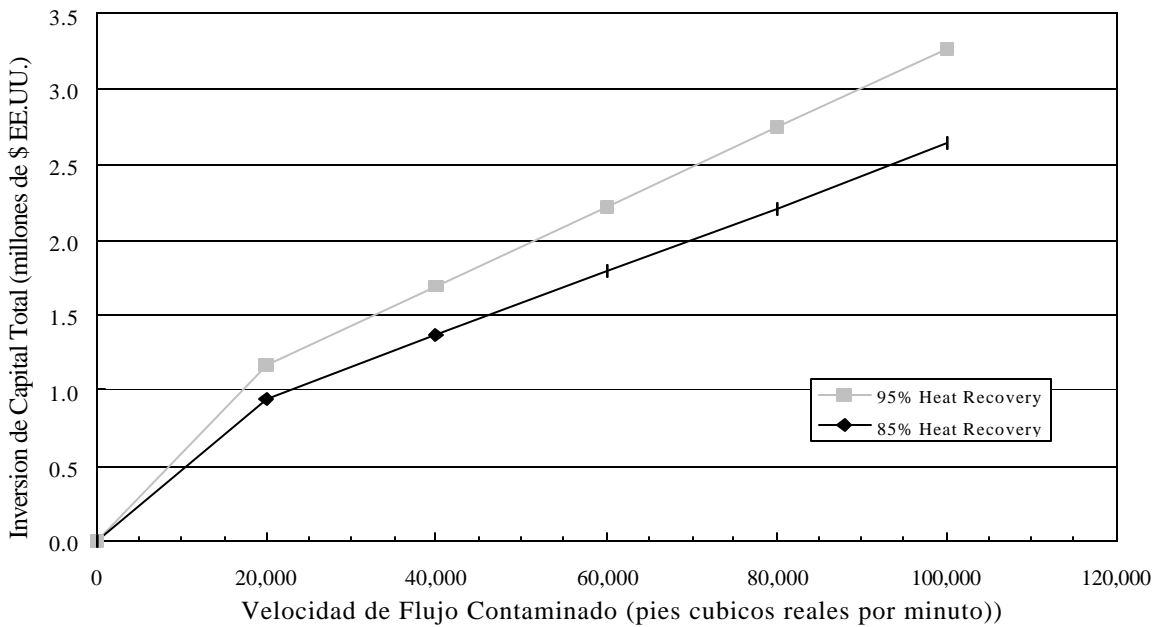


Figura 5.5-6. Inversión de Capital Total vs. Razón de Flujo para un Oxidador Termal Regenerativo con 85 y 95 Por Ciento de Recuperación de Calor (Referencia 12).

Los costos indirectos anuales incluyen los impuestos, la aseguranza, los costos administrativos, el gasto de mantenimiento y la recuperación del capital. Todos estos costos excepto el gasto de mantenimiento dependen de la ICT. La tabla 5.5-4 enumera los parámetros de costo anuales que impactan a los costos de los incineradores, con valores típicos proporcionados para cada parámetro. La tabla 5.5-5 proporciona los factores de costo anuales para los incineradores. Es difícil generalizar estos costos para todos los incineradores, ya que los costos anuales son muy específicos del sitio.¹¹

Los requisitos suplementarios de combustible y electricidad para un incinerador con probabilidad tendrán un gran impacto sobre los costos anuales del incinerador. Los requisitos para cada uno pueden ser estimados a partir de los valores de diseño del incinerador. El requisito de calor auxiliar a ser suministrado por el combustible, generalmente gas natural, puede ser calculado usando las ecuaciones para el diseño de incineradores descritas a continuación.

Un incinerador está diseñado para manejar una razón de flujo volumétrico de gas total (Q_f) igual a la razón de flujo de entrada del gas residual (Q_i), y la razón de flujo del gas combustible auxiliar (Q_a):

$$Q_f = Q_i + Q_a \quad \text{(Ecuación 5.5-4)}$$

y en donde los requisitos para el gas combustible auxiliar se determinan con la ecuación siguiente:

$$Q_a = (x/y)(Q_i) \quad \text{(Ecuación 5.5-5)}$$

$$\text{para } x = (1.1 C_{pf} (T_f - T_r)) - (C_{pi} (T_i - T_r)) - h_1 \quad \text{(Ecuación 5.5-6)}$$

$$y = h_a - 1.1 C_{pf} (T_f - T_r) \quad \text{(Ecuación 5.5-7)}$$

en donde Q_f es la razón de flujo del gas de escape (pies cúbicos estándar por minuto PCEM), Q_i es la razón de flujo del gas contaminado de entrada (PCEM), Q_a es el requisito de gas combustible auxiliar (calor) abandonando la cámara de combustión (Btu/pie cúbico estándar-°F), C_{pi} es la capacidad de calor promedio del gas entrando la cámara de combustión s the mean heat capacity of gas entering the combustion chamber (Btu/pie cúbico estándar-°F), T_f es la temperatura de la cámara de combustión (°F), T_i es la temperatura del gas contaminado de entrada (°F), T_r es la temperatura de referencia, igual a la temperatura del combustible contaminado (típicamente 70°F), h_1 es el contenido de calor del gas residual (Btu/pie cúbico estándar), y h_a es el valor de calentamiento del combustible (Btu/pie cúbico estándar).

La electricidad necesaria para hacer funcionar el ventilador de escape del incinerador se calcula con la ecuación siguiente:

Tabla 5.5-4. Parámetros de Costo Anuales para los Incineradores (de la referencia 11)

Parameter	Descripción	Valores Típicos
Parámetros de Costo Directos		
Factor de Operación (FO)	Horas de operación anuales del incinerador (INC)	8,000
Mano de Obra del Operador (MOO)	Costo de la mano de obra del operador	\$12.50/hora ^a
Mano de Obra de Mantenimiento (MOM)	Costo de la mano de obra de mantenimiento	1.1 (MOO) ^a
Factor de Turno del Operador (TO)	Fracción del turno del operador en el INC	0.5
Factor de Turno del Mantenimiento (TM)	Fracción del turno de mantenimiento en el INC	0.5
Tarifa de electricidad (TE)	Costo de la electricidad	\$0.07/kW-hora ^a
Combustible (C)	Costo del combustible (gas natural)	\$2.30/10 ³ PCE ^a
Costos Indirectos		
Tasa de interés anual (I)	Costo de Oportunidad del Capital	7 por ciento ^c
Vida de Operación (n)	Vida de operación anticipada del INC	10 años ^{c?}
Factor de Recuperación del Capital (CRF)	Función de (n) e (I)	0.0944 ^d
Impuestos (IMP)	Fracción de TCI ^e	0.01 ^c
Aseguranza (SEG)	Fracción de TCI ^e	0.01 ^c
Costos Administrativos (AC)	Fracción de TCI ^e	0.02 ^c

^a Estimados para 1996 a partir de la información disponible en la actualidad.

^b Estimaciones a partir de las Hojas de Trabajo para el Control de Costos, "CO\$T-AIR" *Control Cost Spreadsheets* (referencia 12).

^c El factor de recuperación del capital se calcula a partir de la fórmula siguiente:

$$FRC = \{I(1+D)^n\} \div \{(1+D)^n - 1\}, \text{ en donde } I = \text{tasa de interés (fracción)} \text{ y } n = \text{vida de operación (años)}.$$

^d La inversión capital total ICT) puede ser escalada a valores actuales usando los Índices Vatavuk para el Control de Costo de la Contaminación del Aire, *Vatavuk Air Pollution Control Cost Indices (VAPCCI)*, descritos en la sección 5.4.5.

Table 5.5-5. Factores de Costo Anuales para los Incineradores (referencia 12).

Artículos de Costo	Fórmula ^a	Factor
Costos Directos		
Mano de Obra		
Operador (MOO)	$(FO) \times (TO) \times (SO)$	A
Supervisor (MOS)	$(FS) \times (MOO)$	0.15 A
Mantenimiento (MOM)	$(FO) \times (TM) \times (SM)$	1.1 A
Materiales para Mantenimiento (MM)	$(FM) \times (MOM)$	1.1 A
Electricidad (E)	Potencia ^b × (TE)	E
Combustible (F)	Combustible ^c × X (TC)	F
Costo Directo Total (CD)		3.35 A+E+F
Costos Indirectos		
Gastos de Mantenimiento	$(VO) \times (MOO + MOS + MOM + MM)$	2.01 A
Recuperación del Capital Total	$(FRC) \times (ICT)$	0.1424 TCI
Impuestos	$(IMP) \times (ICT)$	0.01 TCI
Aseguranza	$(SEG) \times (ICT)$	0.01 TCI
Costos Administrativos	$(CA) \times (ICT)$	0.02 TCI
Costo Indirecto Total (CI)		2.01 A + 0.1824 TCI
Costo Anual Total (CD + CI)		5.36 A + 0.1824 TCI + E + F

^a Incluye los valores descritos también en la tabla 5.5-5.

^b Igual a los requisitos de potencia totales, o sea, la electricidad y el ventilador.

^c Igual a los requisitos auxiliares de combustión.

$$\text{Potencia del Ventilador (kilowatts)} = (1.575 \times 10^{-4}) P Q / n \quad (\text{Ecuación 5.5-8})$$

en donde P es la caída de presión del sistema (pulgadas de agua), Q es la razón de flujo volumétrico del gas a través del sistema ((pies cúbicos estándar por minuto), y n es la eficiencia del ventilador y el motor (por lo general 0.50-0.70).

La figura 5.5-7 muestra las curvas de costo de la operación anual para un ejemplo de incinerador termal con sistemas de recuperación recuperativa de calor a tres niveles de eficiencia de recuperación de calor: 0, 35, y 50 por ciento, y 85 por estas curvas, se supuso que el incinerador de ejemplo operaba 8,000 horas al año, a una temperatura de combustión de 1700°F, con un contenido de calor del gas residual de 4 Btu/pie cúbico estándar. La figura 5.5-7 muestra que los costos de operación anuales para los incineradores con recuperación recuperativa de calor disminuyen con el aumento de la eficiencia del sistema de recuperación del calor, y aumentan con el aumento de las razones de flujo de entrada (tamaño).

La figura 5.5-7 también muestra que los costos anuales para el incinerador de ejemplo con recuperación regenerativa del calor aumentan con el aumento en la razón del flujo de entrada. Los incineradores termales regenerativos alcanzan recuperaciones de calor más altas (85 por ciento vs. 50 por ciento) a costos anuales más bajos que los sistemas recuperativos. Sin embargo, los costos de capital ms altos de los sistemas regenerativos (véase la figura 5.5-6) comparados con los sistemas recuperativos (véase la figura 5.5-5), presentan una opción compensatoria en la selección del tipo de incinerador.

5.5.6 Energía y Otros Impactos Ambientales Secundarios

Ningún residuo líquido, sólido o peligroso se genera del uso de los incineradores termales. Tal como se discutió con anterioridad, los impactos de energía de la operación de un incinerador incluyen aquéllos asociados con la energía requerida para accionar el ventilador y son proporcionales a la razón de flujo del gas y la caída de presión del sistema.

Los óxidos de nitrógeno también son generados como contaminación del air durante la incineración. Debido a las temperaturas de operación más bajas de los incineradores catalíticos, se generan menos NO_x con este tipo de incinerador. Basándose únicamente en la combustión de gas natural, los incineradores termales tienen el potencial para generar 100 libras de NO_x por 10^6 pies cúbicos estándares de gas natural incinerado, y los incineradores catalíticos tienen el potencial de generar 50 libras de NO_x por 10^6 pies cúbicos estándares de gas natural.¹³

5.5.7 Referencias para la Sección 5.5

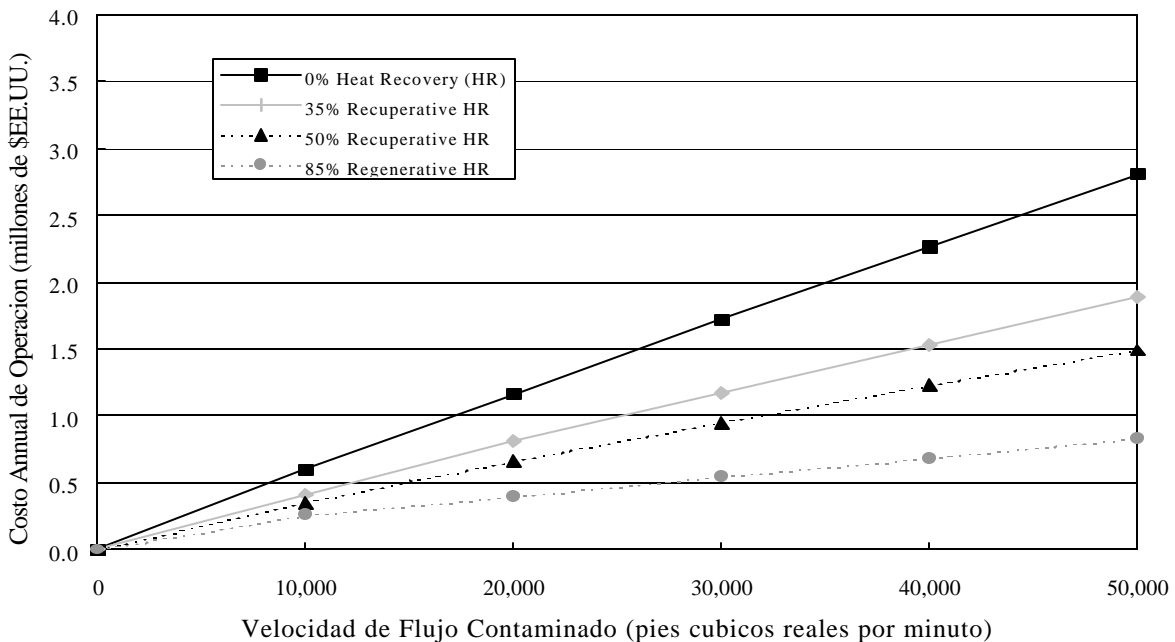


Figura 5.5-7. Costos Anuales para Incineradores con Recuperación Recuperativa y Regenerativa de Calor (Referencia 12).

1. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a, NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
2. Theodore, L., and A.J. Buonicore. *Air Pollution Control Equipment. Volume II: Gases*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 1988.
3. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Sixth Edition. R.H. Perry and D.W. Green, Eds. McGraw-Hill, Inc., New York, New York. 1984.
4. Hazardous Air Pollutant Emissions from Process Units in the Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry--Background Information for Proposed Standards. Volume 1B: Control Technologies. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November 1992.
5. Buonicore, A.J. "Incineration" in the *Air Pollution Engineering Manual*. A.J. Buonicore, and W.T. Davis, Eds. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania; and Van Nostrand Reinhold, New York, New York. 1992.
6. Reed, R.J. *North American Combustion Handbook*. North American Manufacturing Company, Cleveland, Ohio. 1978.
7. 1990 National Inventory. (Available at earth1.epa.gov/pub/gopher/Emis.Inventory). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. January 1996.
8. Control Techniques for Volatile Organic Emissions from Stationary Sources (EPA-450/2-78-002). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. May 1978.
9. OAQPS Control Cost Manual (Fourth Edition, EPA 450/3-90-006). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January 1990.
10. Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). Volume I (Fifth Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.
11. Vatauvuk, W.M. *Estimating Costs of Air Pollution Control*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan. 1990.
12. Vatauvuk, W.M. "CO\$T-AIR" Control Cost Spreadsheets. Innovative Strategies and Economics Group, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.

13. Organic Chemical Manufacturing, Volume 4: Combustion Control Devices (EPA-450/3-80-026). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. December 1980.

6. CONTROLES DE EMISIONES FUGITIVAS INDUSTRIALES

Esta sección describe las medidas usadas para controlar las emisiones fugitivas de MP provenientes de fuentes industriales. Las fuentes de emisión fugitiva de MP se pueden dividir en dos categorías amplias – fuentes de emisión fugitiva del proceso y fuentes de emisión fugitiva de polvo. Las fuentes de emisiones fugitivas del proceso incluyen emisiones provenientes de operaciones que reciben y/o generan material polvoriento. Las fuentes de emisión fugitiva de polvo son relacionadas a la transferencia, almacenaje y manejo de materiales polvorientos e incluyen aquellas fuentes de las cuales se encauzan partículas por las fuerzas de la naturaleza actuando sobre las superficies polvorientas expuestas o del movimiento de vehículos en carreteras polvorientas.

Los métodos usados con mayor frecuencia para controlar fugitivas de proceso y e encierro/evacuación del edificio. Ambos tipos de sistemas tienen sus ventajas y desventajas, pero la ventilación local es generalmente más efectiva en costo. La optimización del proceso, buena operación y mantenimiento, y otras prácticas específicas de la industria también pueden ser bastante efectivas para reducir emisiones fugitivas de proceso. Sin embargo, la selección del sistema y el rendimiento último del sistema se relacionan ambos a las características de operación y diseño específicas a la instalación y a la industria.

Para la mayoría de las plantas industriales, las carreteras pavimentadas y las sin pavimentar son las fuentes primarias de emisiones fugitivas de polvo. Las emisiones fugitivas de polvo provenientes de las operaciones de manejo para materiales de pila de almacenamiento son generalmente menos significantes a menos que las velocidades del viento sean inusualmente altas.¹ Las velocidades de viento bajas pueden resultar en emisiones significantes si los materiales en las pilas de almacenamiento son finos (por ejemplo, el polvo de horno de cemento o los materiales recolectados por filtros de tela o precipitadores electrostáticos en seco).

El control del polvo de carretera proveniente de carreteras tanto pavimentadas como sin pavimentar, por lo tanto, puede lograr una reducción significativa en las emisiones fugitivas de polvo. La pavimentación de carreteras sin pavimentar; la eliminación, reducción o administración del transporte por camiones; y la limpieza de las calles son las técnicas más efectivas para reducir las emisiones fugitivas de polvo provenientes de las carreteras.

Se puede obtener mayor información sobre las fuentes y controles de emisiones fugitivas de polvo en las publicaciones de la EPA *Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures*,² y *Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42), Volume I: Stationary Point and Area Sources*.³

6.1 CIRCUNVALACIÓN Y VENTILACIÓN

Cubiertas parciales o completas, rompe vientos, extractores y otros sistemas de ventilación, y la evacuación completa del edificio, son métodos usados frecuentemente para capturar y controlar emisiones fugitivas de MP. Estos métodos son generalmente usados con los dispositivos tradicionales para el control de la MP en chimeneas (por ejemplo, los filtros de tela o los depuradores) para recolectar la materia particulada capturada. Los procesos amenos a este tipo de control incluyen a los dispositivos para el manejo de materiales tales como los transportadores, los elevadores, los alimentadores, las operaciones de carga y descarga, y el embolsamiento; la beneficiación de sólidos, tal como el trituración, la separación a través de malla, y otras operaciones de clasificación; la minería, o sea, el perfora miento y el triturado; y los hornos y secadores.⁷

6.1.1 Sistemas de Ventilación Local

Los sistemas de ventilación local pueden consistir de un extractor “secundario” en una fuente localizada de emisiones de MP o un gran extractor de tipo dosel suspendido sobre la totalidad de la fuente. Un ejemplo de un extractor local secundaria es un extractor móvil que se usa para recolectar las emisiones proveniente de macetas u otros recipientes que se separan para su enfriamiento. Los sistemas de ventilación por lo general son diseñados de manera única para conformarse a la configuración de las instalaciones y la necesidad de acceso al proceso; estos factores, sin embargo, pueden limitar tanto su rendimiento como su diseño. Los extractores y su tubería pudieran se difícil de actualizar en algunas instalaciones debido a limitaciones de espacio. Además, los sistemas de ventilación local pudieran limitar el acceso de personal o equipo. Por estas razones, un sistema de ventilación local pudiera no ser un método factible de control de emisiones para algunas operaciones. La información sobre el diseño de sistemas de ventilación local en general y para aplicaciones específicas de la publicación de *American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)*, la conferencia americana de higienistas industriales gubernamentales: *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice*.

La mayoría de los sistemas de ventilación están diseñados para cumplir varios objetivos.¹ Primero, el extractor debe encerrar la fuente en el mayor grado posible sin interferir excesivamente con el acceso necesario para las operaciones normales. Segundo, el extractor debe estar configurada de tal manera que la flotabilidad natural o las fuerzas mecánicas dirijan a la pluma hacia dentro, en vez de hacia afuera, del extractor. Finalmente, el sistema debe ser diseñado con una ventilación de escape suficiente para mantener las velocidades de faz en todas las caras de la extractor. Típicamente, estas velocidades se encuentran dentro de un rango de 75 a 150 metros por minuto. De manera adicional, para las plumas flotantes que generan una corriente natural, la velocidad de ventilación debe exceder la velocidad de generación de la pluma, de otra manera ocurrirá un “derrame” proveniente del extractor.¹

Las operaciones metalúrgicas, tanto primarias como secundarias, generan una cantidad grande de emisiones fugitivas de MP. Una de las fuentes principales de emisiones fugitivas de los procesos

metalúrgicos que pueden ser controladas con ventilación local son los hornos de tipo estacionario tales como los hornos de explosión, los hornos reverberos, y las cúpulas. Los extractores pueden ser diseñados para recolectar gas perpendicular al flujo del gas flotante, en el cual se requieren altas velocidades de faz; otros diseños pueden ser tales que la pluma de gas flotante es dirigida hacia dentro del extractor. La figura 6-1 muestra un sistema de ventilación local en una zona de sacudimiento del residuo de un horno de explosión.^{1,4} Sería necesario un diseño de ventilación local muy diferente para los hornos giratorios y de arco eléctrico no estacionario que giran durante su operación. Una característica clave de estos sistemas es que el cargado y el sacudimiento ocurren en la misma zona general. Por tanto, los extractores deben ser diseñados de tal manera que no interfieran con ninguna de las dos operaciones.

Las operaciones de manejo de materiales también pueden ser equipadas con ventilación local para el control de las emisiones fugitivas de MP. La figura 6-2 muestra un sistema de ventilación local en una estación de montacargas que es parte de una operación metalúrgica.

Un sistema de captura por cortina de aire es un sistema de ventilación local diseñado especialmente que puede capturar las emisiones fugitivas provenientes de un proceso sin interferir en las operaciones normales, tales como el uso de una grúa elevada. Con una cortina de aire, se sopla el aire a través del espacio por encima de la operación generadora de MP usando un pleno o fila de boquillas diseñadas para formar una lámina de aire que cause la menor turbulencia posible. La cortina de aire, el aire encauzado (proveniente de encima y debajo de la cortina) y la MP, incluyendo los humos con MP fina, son capturados por el sistema de escape. La captura de MP fugitiva es mayor del 90 por ciento. Este tipo de sistema ha sido usado con éxito en la producción primaria del cobre.¹

6.1.2 Circunvalación de Edificio / Evacuación

Encerrar y ventilar un edificio por completo puede ser el único método de control factible cuando la operación de proceso se caracteriza por un número de fuentes pequeñas de emisiones fugitivas. Un sistema típico de evacuación de un edificio podría consistir en ventiladores montados en paredes opuestas que forzan aire a través del equipo de proceso y hacia fuera mediante un pleno elevado hasta un filtro de tela.⁵ Con el propósito de limitar la exposición del trabajador a las emisiones y expulsar el calor generado por las operaciones de proceso, se requieren grandes velocidades de flujo de aire. Por ello, los costos operacionales para este tipo de sistema pueden ser prohibitivos. Además, la necesidad de mantener el edificio cerrado durante la operación del sistema de ventilación pudiera ser demasiado restrictiva sobre las operaciones de proceso, tales como el movimiento de carretillas elevadoras y otro equipo hacia adentro y afuera del edificio.¹

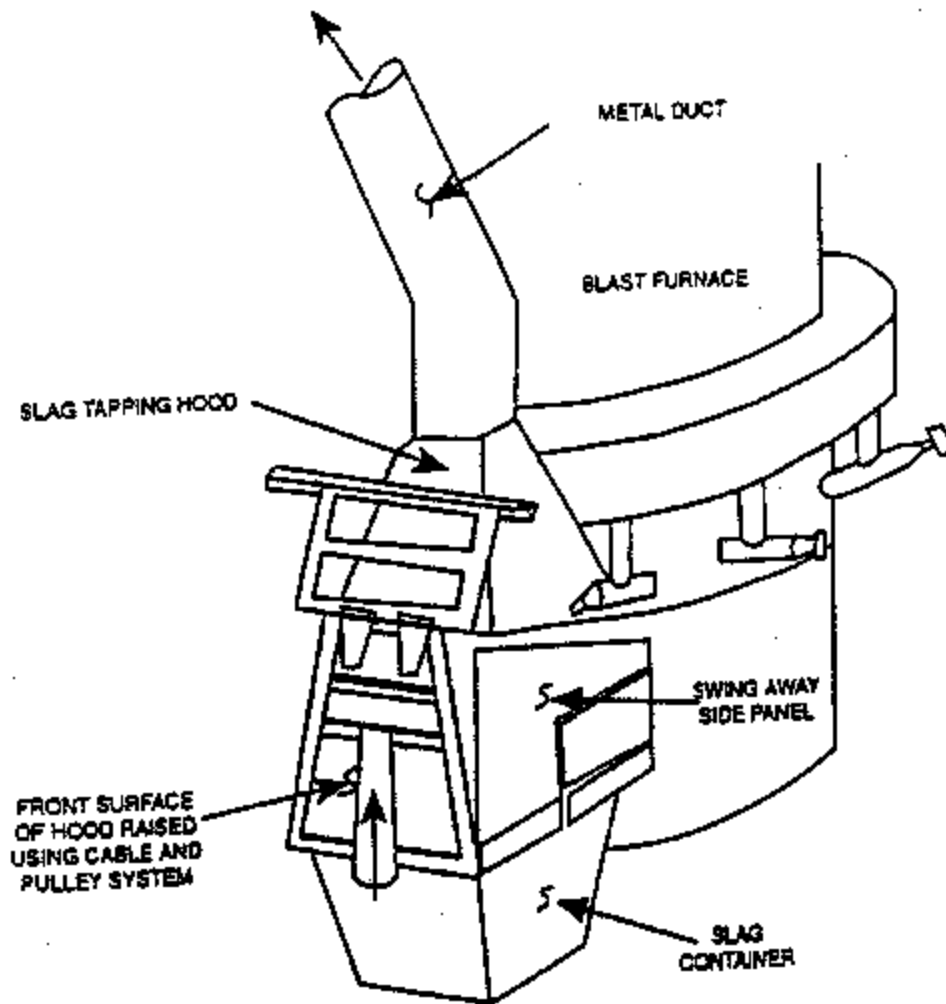


Figure 6-1. Schematic of a Slag-tapping Hood at a Blast Furnace (from Reference 4).

Traducción de los términos de la figura 6.1

Metal duct = Ducto metálico	Blast furnace = Horno de Explosión
Slag tapping duct = Ducto sacudidor de residuo	Slag container = Recipiente para residuo
Front surface of hood raised using cable and pulley system = Superficie frontal del extractor elevada usando un sistema de cable y polea	Swing away side panel = Panel lateral giratorio

Figura 6-1. Esquemática de un Extractor Sacudidor de Residuo en un Horno de Explosión (Referencia 4).

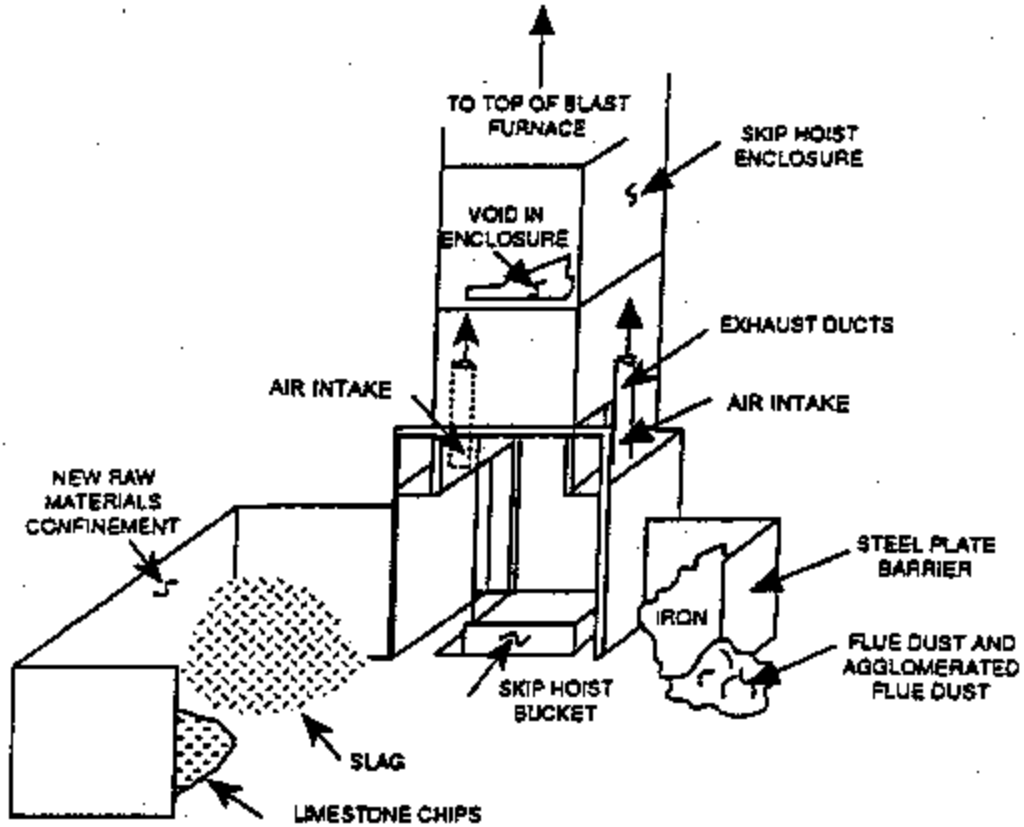


Figure 6-2. Schematic of a Local Ventilation System at a "Skip Hoist" Loading Station

Traducción de los términos de la figura 6.2

To top of blast furnace = A la parte superior del horno de explosión	Air Intake= Entrada de Aire
Skip hoist enclosure = Recinto para el montacargas	Slag = Residuo
Skip hoist bucket = Cubeta del montacargas	Limestone chips = Trozos de piedra caliza
Void in enclosure = Vacío en el recinto	Exhaust Ducts = Ductos de Escape
New raw materials confinement = Confinamiento de materia prima nueva	Iron = Hierro
Flue dust and agglomerated flue dust = Polvo de la chimenea y polvo aglomerado de la chimenea	

Figura 6-2. Esquemática de un Sistema de Ventilación Local en una Estación de Carga por Montacargas

6.2 OPTIMIZACION DE EQUIPO Y OPERACIÓN

La optimización de equipo y operación incluye: 1) limitar la cantidad de polvo disponible para emisiones; 2) mejorar el arreglo de materiales que generan polvo; 3) optimizar el proceso de la manera que se use, genere, o se vuelva vulnerable al contacto del aire una menor cantidad de material polvoriento; y 5) otros buenos procedimientos de operación y mantenimiento que reduzcan las emisiones de MP. En algunas industrias, optimizar el equipo y la operación para reducir las emisiones de MP también puede reducir los costos de operación si se pueden recuperar y usar productos y/o materiales valiosos.

6.2.1 Reducción de Extensión de la Fuente y Mejoramiento

Las medidas de reducción de la extensión de la fuente son en mayor parte una función de las buenas prácticas de trabajo e incluyen medidas diseñadas para reducir el volumen y/o superficie perturbada de materiales generadores de MP o reducir la frecuencia de derrames o perturbaciones.^{1,7} Estas metas por lo general pueden ser logradas mediante buenas prácticas de trabajo y sin una gran inversión en un programa de control.¹

Los ejemplos de reducciones/mejoramientos en la extensión de las fuentes incluyen:¹

- C Reducción de la altura de caída mediante el uso de transportadores de brazo de bisagra, escaleras sólidas, pozos bajos, etc.⁷ La tabla 6-1 enumeran las eficiencias de control estimadas para los mejoramientos por medio de técnicas de reducción de la altura de caída;⁶
- C Uso de materia prima menos polvoriento;
- C Conductos descendentes telescópicos o de alimentación para confinar el material que está siendo transferido;⁷
- C Aumentar la retención de humedad en zonas polvorientas;¹
- C Enjuagar o raspar las cintas transportadoras con regularidad;
- C Realizar actividades generadoras de MP sólo a medida que sea necesario, por ejemplo, en la producción secundaria de plomo, la interrupción de las baterías sólo a medida que sea necesario para mantenerse al corriente con el horno;¹
- C Monitoreo de los materiales de suministro para identificar condiciones generadoras de MP;¹

Table 6-1. Eficiencias de Control Estimadas para las Técnicas de Reducción de la Altura de Caída (de la Referencia 6)

Técnica	Eficiencia de Control (por ciento)
Bajando el pozo o el tubo perforado	80
Conducto descensor telescópico	75
Escalera sólida	50

- c Uso de chatarra limpia en hornos fundidores de metal;⁷ y
- c Remoción del aceite del cigüeñal previo a la demolición de automóviles.⁷

6.2.2 Optimización del Proceso / Modificación

La optimización y/o modificación puede ser una medida preventiva efectiva para el control de emisiones fugitivas de proceso. En esta categoría también se incluyen la optimización de los dispositivos de control de MP primarios y sus sistemas de captura. Algunas técnicas generales son:

- c Reducción en la frecuencia de la transferencia de masa,
- c Eficiencia operacional mejorada, y
- c Uso y operación apropiada de los dispositivos para la recolección de polvo en el punto de su generación.

Algunas técnicas de optimización específicas del proceso son:

- c Diseñar de una planta de ácido sulfúrico en una fundición primaria de plomo con capacidad suficiente para preclude la creación de presión reversa y la ventilación en exceso de la máquina esmeriladora.¹
- c Cambiar una cúpula por un horno con arco eléctrico.⁷
- c Cambiar un elevador (abierto) de cubeta por un transportador neumático más eficiente (cerrado).⁷

- C Separar y eliminar el coque de tamaño reducido (<1 pulgada) para reducir las emisiones fugitivas de los hornos de explosión en las fundiciones primarias de plomo.¹
- C Mejorar la eficiencia de combustión de los hornos de explosión durante la fundición primaria del plomo mediante el mejoramiento del sistema de enfriamiento del agua del horno.¹
- C Inyectar sodio fundido durante el escoriamiento por caldera en la fundición primaria de plomo para formar una maraña líquida en vez de escoria.¹
- C Eliminar la MP fugitiva proveniente del transporte, vaciado, y agitación del plomo fundido mediante el uso de un escoriamiento continuo por caldera en vez de uno manual en la fundición primaria de plomo (como se realiza en la actualidad solamente en instalaciones en el extranjero).¹
- C Mejorar la calidad de la materia prima, o sea, mejorar la calidad del coque y del concentrado para esmerilado usado en la producción primaria de plomo.¹
- C Enfriar las calderas de plomo para reducir la generación de humos durante el escoriamiento por caldera en la producción primaria de plomo.¹
- C Bombear el plomo (primario) directamente hacia las calderas de escoriamiento usando una bomba electromagnética.¹
- C Aglomerar el polvo de la chimenea de un horno de explosión en un horno aglomerador para reducir la carga sobre la casa de bolsas y mejorar su rendimiento. Este proceso elimina por completo el manejo del polvo y las emisiones fugitivas asociadas, y elimina las emisiones fugitivas provenientes de las pilas de almacenamiento del polvo de la chimenea.¹
- C Usar vaciados de molde permanentes en las fundiciones de acero gris en vez de arena verde. Se reporta que ésto reduce las emisiones de MP en un 99 por ciento.¹
- C Tratar previamente las materias primas para la manufactura de vidrio para reducir la cantidad de partículas finas. Los pretratamientos incluyen: el esmerilado previo, el adoquinado, la formación de perdigones o el tratamiento con álcali líquido.
- C Reponer los lubricantes de grasa y aceite (por ejemplo, en la manufactura de vidrio) con emulsiones de silicón y aceites solubles en agua que eliminan el humo generado por la vaporización alérgica (relámpago) de hidrocarburos provenientes de las grasas y aceites que entran en contacto con los materiales de proceso.¹

6.2.3 Prevención de Fugas y y Detección Otras Buenas Prácticas de Operación y Mantenimiento

Las buenas prácticas de operación y mantenimiento pueden ayudar a reducir las emisiones fugitivas de MP de manera significativa. Un aspecto clave de un buen programa de operación y mantenimiento para reducir las emisiones de MP es un programa formalizado de prevención y detección de fugas. Algunos ejemplos de puntos que pueden ser incluidos en un programa son: 1) un diseño adecuado y una reparación rápida de las fugas en extractores de escape; 2) mantenimiento de los sellos de puertas y ventanas;¹ un sello apropiado.⁷

Las buenas prácticas de limpieza y/o la respuesta rápida a las perturbaciones, accidentes y derrames de proceso también son elementos clave en el control del polvo fugitivo. Esto previene la acumulación de material polvoriento que puede ser suspendido de nuevo dentro de corrientes localizadas. Las buenas prácticas de administración y aseo incluyen los procedimientos siguientes: ¹

- C Lavar los interiores del edificio de manera regular,
- C Humedecer los pisos durante los períodos altos en polvo,
- C Usar compuestos con base de aceite para barrer,
- C Limpiar los barriles en húmedo después del embalaje de los productos,

Un sistema central al vacío podría ser efectivo en costo para operaciones especialmente polvorientas.¹ Se podría requerir un equipo de limpieza de tiempo completo para que ciertas instalaciones implementaran los procedimientos anteriores de manera regular.^{1,7}

La operación apropiada del equipo es una buena práctica industrial para prevenir las emisiones fugitiva de polvo. Un ejemplo que puede ser aplicable a un número de industrias, especialmente en metalurgia, es la operación de los hornos de manera que no sean sobrecargados para eliminar la posibilidad de presión reversa proveniente del sistema de control de MP primario tanto como la “hinchazón” durante la apertura de la puerta recargadora.⁷ También se han utilizado con éxito los programas de incentivos para los empleados para prevenir las emisiones fugitivas de polvo.¹

6.3 COSTOS DE LOS EXTRACTORES

El capítulo 10 de *OAQPS Cost Manual*, el manual de Costo de la *OAQPS*, proporciona información sobre la estimación de costos para los extractores con campana circular, campana rectangular, de empuje y arrastre, de corriente lateral y de corriente reversa (con ranura).⁸

Los costos de los extractores se estiman usando los parámetros de la tabla 6.2 en la siguiente ecuación:

$$C_h = aA_f^b \quad (6.1)$$

en donde C_h = costo del extractor (\$)
 A_f = superficie de entrada del extractor (faz) (pies cuadrados)
 a, b = parámetros de regresión de la ecuación

6.4 CONTROL DEL POLVO FUGITIVO

Para información sobre el control del polvo fugitivo, por favor refiérase a los documentos *Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures* (EPA-450/2-92-004) y *Control of Open Fugitive Dust Sources* (EPA-450/3-88-008).

Tabla 6.2. Parámetros para la Ecuación de Costo de Extractores (Referencia 8)

Tipo de Extractor	Material de Fabricación ^a	Material de la Ecuación		Rango de la Ecuación (A_f pies ²) ^b
		a	b	
Dosel, circular	PRF	123	0,575	2 - 200
Dosel, rectangular	PRF	294	0,505	2 - 200
Empuje y arrastre	PRF	595	0,318	2 - 200
Corriente Lateral	PRF	476	0,332	2 - 200
Corriente Reversa, con ranura ^c	CPV	303	1,43	0.6 - 2.0
Corriente Reversa, con ranura ^d	CPV	789	0,503	1. 1- 2.1
Corriente Reversa, con ranura	PP	645	0,714	1. 1- 2.1
Corriente Reversa, con ranura	PRF	928	0,516	1. 1- 2.1
Corriente Reversa, con ranura	Acero Galvanizado	688	0,687	0.5 - 1.3

^a PRF = plástico reforzado con fibra de vidrio, CPV = cloruro polivinílico, PP = polipropileno

- b Para los extractores con ranuras, el rango de las ecuaciones indica el rango en la superficie de las aperturas de la ranura, el cual es mucho menos que la superficie total de la faz.
- c Los extractores con dos filas de ranuras y sin reguladores de tiro.
- d Extractores con cuatro filas de ranuras y reguladores de tiro con ranura manuales.

6.5 REFERENCIAS PARA LA SECCION 6

1. Estimating and Controlling Fugitive Lead Emissions from Industrial Sources (EPA-452/R-96-006). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. May 1996.
2. Fugitive Dust Background Document and Technical information Document for Best Available Control Measures (EPA-450/2-92-004). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1992.
3. Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). Volume I (Fifth Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. January 1995.
4. Coleman, R., Jr. and R. Vandervort. Demonstration of Fugitive Emission Controls at a Secondary Lead Smelter in *Lead-Zinc-Tin 1980*, J.M. Cigan, T.S. Mackey, and T.J. O'Keefe (eds.). Proceedings of TMS-AIME World Symposium on Metallurgy and Environmental Control in Las Vegas, Nevada, February 24-28, 1980. 1981.
5. Smith, R.D., O.A. Kiehn, D.R. Wilburn, and R.C. Bowyer. Lead Reduction in Ambient Air: Technical Feasibility and Cost Analysis of Domestic Primary Lead Smelters and Refineries. Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C. 1987.
6. Bohn, R., T. Cuscino, Jr., and C. Cowherd, Jr. Fugitive Emissions from Integrated Iron and Steel Plants (EPA-600/2-78-050). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. March 1978.
7. Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a, NTIS PB83-127498). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.
8. OAQPS Control Cost Manual (Fourth Edition, EPA 450/3-90-006). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January 1990.

7. TECNOLOGÍAS EMERGENTES

Esta sección discute las tecnologías que están siendo desarrolladas en la actualidad para mejorar la operación y/o eficiencia de recolección de los dispositivos para el control de partículas. En muchos casos, el aumento en la eficiencia de recolección se logra a través del aumento en la recolección de partículas finas.

Las secciones a continuación presentan las tecnologías emergentes para los filtros de tela, PES, depuradores y dispositivos mecánicos de control. Las técnicas de control que permiten el control simultáneo de MP junto con otros contaminantes se discuten aquí, a pesar del hecho de que las eficiencias de recolección de MP de los dispositivos pudieran no ser sustancialmente más altos que en los dispositivos tradicionales; estos dispositivos son incluidos aquí debido a los grandes ahorros en eficiencia que son ofrecidos por los métodos. La tabla 7-1 resume las tecnologías presentadas en esta sección.

7.1 TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA FILTROS DE TELA

Las tecnologías emergentes para los filtros de tela incluyen 1) los elementos de filtro de cerámica y el mejoramiento con fibras cerámicas, 2) las fibras finas 1.1 dtex, y 3) la filtración por tela estimulada electrostáticamente (FTEE). Estas tecnologías se discuten a continuación.

7.1.1 Cerámicas: Elementos del Filtro de Cerámica y Mejoras con Fibras Cerámicas

Se han puesto a disposición filtros de cerámica (Altair, Ltd., UK; Didier, GmbH, FRG) que pueden ser usados en aplicaciones de filtración de MP a temperatura alta. El material de cerámica se moldea en elementos cilíndricos y rígidos para filtro, llamados “candelas”. Los tubos son por lo general de 1 a 1.5 metros de longitud, con diámetros exteriores de 60 mm y un espesor de pared de 10 a 20 mm. Un extremo del tubo está cerrado y el otro está abierto. Los extremos cerrados de los tubos se encuentran montados ya sea verticalmente u horizontalmente sobre una lámina de tubo, tal como en el caso de las bolsas de tela. Por lo general, los tubos son limpiados por medio de propulsión a chorro pulsado.¹

Las fibras cerámicas han sido procesadas con éxito convirtiéndolas en hilado sintético y tejidas para formar material para filtros de tela por la compañía *3M Inc.* Estas bolsas realizadas con cerámica, llamadas Nextel®, son capaces de una filtración de alta eficiencia (>99 por ciento) de corrientes de gas a temperaturas de hasta 1400°F. La operación a temperaturas altas ahorra el gasto del enfriamiento del gas, reduce el mantenimiento debido a la condensación de gases corrosivos, permite la recuperación de energía, y permite la remoción de MP del gas caliente antes de realizar otros procesos con catalizadores. *Electric Power Research Institute (EPRI)*, el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica en EE.UU., se encuentra en la actualidad realizando pruebas sobre el rendimiento de estas bolsas.²

Tabla 7-1. Resumen de Tecnologías Emergentes para el Control de MP

Dispositivo	Tecnología	Beneficio
Filtro de Tela	<ol style="list-style-type: none"> 1) Cerámicas elementos de fibra cerámica y mejoramiento de bolsas de fibra cerámica 2) Fibras Finas 1.1 dtex Fibers 3) Filtración por Tela Estimulada Electrostáticamente (FTEE) 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Capacidades para Temperaturas Altas 2) Mayores eficiencias de control de MP fina 3) Mayores eficiencias de control de MP y menor caída de presión
PES	<ol style="list-style-type: none"> 1) Martilladores con Bocina Sónica 2) PES con Precargador de Tubo Frío 3) SUPER PES 4) Sistema Avanzado de Control Basado en Computadoras 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Mejor eficiencia de limpieza de placas, costos capitales menores, menores requisitos de energía, menos mantenimiento, y menos tiempo sin funcionamiento. 2) Mayor eficiencia de control de MP, especialmente para la MP con alta resistividad 3) Mayor eficiencia de control de MP, especialmente para la MP con alta resistividad; PES menores; y elimina la necesidad de acondicionamiento del gas del tubo de escape 4) Mayor eficiencia de control de MP

(continúa)

Tabla 7-1. (continuación)

Dispositivo	Tecnología	Beneficio
Dispositivos de Combinación	PES/Filtro de Tela Híbrido COHPAC	Mayor eficiencia de control de MP, especialmente para MP ₁₀ ; menor tamaño, y menos tiempo sin funcionamiento que un PES
Depurador	<ol style="list-style-type: none"> 1) Depurador Tipo Venturi con Orificio Anular 2) Malla de Red de Agua 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Mayor eficiencia de control de MP, especialmente para PM_{2.5} 2) Mayor eficiencia de control de MP, menos obstrucciones
Recolector Mecánico	Separador de Núcleo	Mayor eficiencia de control de MP
Polvo Fugitivo	<ol style="list-style-type: none"> 1) Ionizador de MP de Alto Voltaje 2) Neblina Seca 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Mayor eficiencia de control de MP (control de #100 por ciento) para la MP \$0.005 μm, tanto como \$99 por ciento del SO₂ y del NO_x, y \$95 por ciento de los COV 2) 10 por ciento de los requisitos de agua para las técnicas de aspersión convencionales
Control Simultáneo	<ol style="list-style-type: none"> 1) Filtro de Tela Catalítico SO_x-NO_x-Rox Box (SNRB) 2) Filtros de Tela Recubiertos de Catalizador 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Controla SO_x y NO_x tanto como MP (Rox) 2) Controla NO_x y MP

7.1.2 Fibras Finas 1.1 dtex

Han sido desarrolladas fibras finas nuevas de 1.1 dtex (densidad textil - gramos de fibra por 10,000 metros de fibra) por *Dupont, GmbH* (República Federal de Alemania), para la filtración por tela de alta eficiencia. Las fibras finas se encuentran disponibles en materiales de Nomex® y Teflon®. Las fibras finas poseen la mitad el peso de las fibras Nomex estándar. La ventaja de las fibras nuevas es que mientras dos fibras finas (de 1.1 dtex) pesan lo mismo que una fibra estándar (de 2.2 dtex), las fibras finas tienen un 40 por ciento más de superficie de filtro. Esto permite la construcción de un medio de filtración más denso y menos poroso. Los mejoramientos potenciales en la operación de un filtro de tela incluyen una mayor eficiencia al mismo peso de medios, o medios más ligeros con la misma o mejor eficiencia. Estas fibras finas son apropiadas para la operación en filtros de tela con propulsión a chorro.³

7.1.3 Filtración por Tela Estimulada Electrostáticamente (FTEE)

Han sido desarrollados filtros de tela estimulados electrostáticamente (FTEE) que reducen la caída de presión a través del filtro de tela y reducen la penetración de las partículas significativamente. Se ha descubierto que las partículas cargadas eléctricamente forman capas de polvo altamente porosas en los filtros de tela.⁴ Un tipo de FTEE implica la colocación de electrodos de descarga (alambres) axialmente dentro de bolsas de filtro de aire reverso con fibras conductivas entretejidas en la bolsa. Esto genera un campo eléctrico entre el alambre y la superficie de la bolsa. Un segundo tipo de FTEE usa la colocación externa de alambres de descarga dentro de un arreglo de bolsas con propulsión a chorro.¹⁷ Otra variación de FTEE incluye la colocación de un módulo dentro de un PES existente, discutido en la sección 7.3.⁵

7.2 TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA PES

Las tecnologías emergentes para PES incluyen 1) martilladores con bocina sónica, 2) PES con pre-cargador de tubo frío, 3) secciones de pre-colector de PES alternadas cortas y largas (SUPER PES), y 4) sistemas avanzados de control de PES basados en computadoras. Estas tecnologías se discuten a continuación.

7.2.1 Martilladores con Bocina Sónica

Los martilladores con bocina sónica para la limpieza de los PES han sido desarrollados por *Atlantic Electric, Ltd.* (Reino Unido) para su aplicación en la industria generadora de electricidad para servicio público para mejorar la limpieza de las placas de los PES. Se encontró que las bocinas sónicas, utilizadas con los martilladores de impulso magnético e impacto por gravedad (IMIG), son superiores a los martillos rodantes en cuestión de costos de capital más bajos, menores requisitos de energía, menos mantenimiento y menos tiempo fuera de operación.⁶

7.2.2 Pre-cargador PES de Tubo - Frío

Un PES de tubo frío ha sido desarrollado por *Denver Research Institute* (EE.UU.). Este dispositivo circula agua fría a través de el tubo de una sección del pre-cargador de un PES de tubo-alambre. Esta configuración reduce la resistividad de la capa de polvo recolectada sobre el exterior del tubo frío y alcanza un nivel muy alto de carga sobre las partículas de polvo encauzadas en una distancia de flujo muy corta. El *retrofit* de los PES existentes con pre-cargadores de tubo frío demostró que el efecto de la adición de una sección de un tubo frío excedió los efectos negativos de la corona reversa, y mejoró la eficiencia de recolección significativamente con los polvos de alta resistividad.^{7,8}

Una aplicación potencial de esta tecnología consiste en la colocación de un pre-cargador de tubo frío en línea corriente abajo de un PES convencional que posee al menos una sección eléctrica principal. El pre-cargador de tubo frío puede tener tunos de recolección sustancialmente más cortos que en el PES principal, y puede ser operado con una densidad de corriente del 75 por ciento o menos que en la sección principal del PES.⁹ Otra aplicación implica la colocación de un pre-cargador al frente de cada sección recolectora de un PES con placa de alambre. A esta segunda aplicación se le refiere como un PES “de plataformas múltiples”.¹⁷ Un concepto nuevo de PES de plataformas múltiples usa secciones más pequeñas precedidas por pre-cargadores de tubo frío, discutido en la próxima sección.

7.2.3 Secciones Re-colectoras Alternadas Cargadoras y Cortos PES (SUPER PES)

Al separar las secciones cargadoras y recolectoras y optimizar a cada una por separado, se ha desarrollado un nuevo concepto llamado SUPER PES. En vez de secciones de PES largas con placa de alambre, el SUPER PES usa un pre-cargador de tubo de alambre (tubo frío) descrito previamente seguido de una sección abreviada de recolector de placa de alambre.¹⁰ La investigación ha demostrado que la eficiencia de recolección de una sección de SUPER PES de 3-4 alambres es equivalente a una sección de PES convencional de 7-8 alambres para el polvo de menor resistividad. Por lo tanto un PES nuevo utilizando este concepto puede ser sólo de una mitad a un cuarto de la longitud de un PES convencional; o un PES existente puede ser mejorada reemplazando una sección con dos o más secciones de SUPER PES en el mismo espacio.¹¹

7.2.4 Sistemas Avanzados de Control de PES Basados en Computadoras

La operación de un PES puede ser optimizada con el uso de un sistema de control computarizado. La computadora puede ser programada para monitorear y controlar los parámetros del PES que influyen la eficiencia, y hacerlo de manera que exceda la capacidad de las técnicas manuales. Por ejemplo, la computadora puede identificar la existencia de la corona reversa y enseguida cambiar la corriente o los ajustes de voltaje del PES de tal manera que se eviten o minimice la influencia de la corona reversa. Otro ejemplo de control avanzado de PES basado en computadoras es un método usado por la Compañía *Mitsubishi* en el Japón, en donde la energización intermitente¹²

controlada por computadora se logra dentro de un PES, tal como sea necesario para evitar la corona reversa.¹⁷

7.3 DISPOSITIVOS DE COMBINACIÓN EMERGENTES

Un híbrido de combinación entre filtro de tela y PES ha sido desarrollado por *EPRI* y se llama *Compact Hybrid Particulate Collector (COHPAC)*, Recolector de Partículas Compacto Híbrido. Este dispositivo implica el uso de la filtración por tela con propulsión a chorro para capturar la MP que escapa a un PES. El dispositivo tiene dos diseños llamados *COHPAC I* y *II*. El *COHPAC I* consiste en la colocación de un filtro de tela (con propulsión a chorro) corriente abajo de un PES. El *COHPAC II* utiliza un filtro de tela en lugar de el (los) último(s) campo(s) de un PES.^{13,14, 15,16} El *COHPAC* ha sido probado con éxito en instalaciones piloto en calderas de servicios públicos.¹⁷ En una configuración similar al *COHPAC II*, una innovación desarrollada por la *EPA* es reemplazar la última sección de un PES con un FTEE con propulsión a chorro y mantener un campo de alto voltaje de carga y recolección con la fuente de energía existente del PES. Esto resulta en emisiones menores por una orden de magnitud y una pérdida de presión significativamente más baja que aquella de un filtro de tela no cargado.⁵

El *COHPAC* une las ventajas de un PES y un filtro de tela. Las ventajas debidas al componente del filtro de tela del *COHPAC* son:¹⁷

- c Menos sensitivo a cambios en la composición del combustible, en relación a un PES, puesto que un filtro de tela en estado de equilibrio tiene emisiones constantes del tubo de salida.
- c Mejor eficiencia de recolección de MP₁₀, como es típico para la filtración de tela.
- c Se puede utilizar el mantenimiento en línea para la sección del filtro de tela del *COHPAC*, resultando en menos tiempo fuera de operación.

Las ventajas debidas a un recolector de PES corriente arriba son:¹⁷

- c El cargado de MP hacia el filtro de tela es lo suficientemente bajo para permitir que el filtro de tela opere a una relación muy alta de gas a tela (10-18 pies/minuto), sin una caída de presión o penetración excesivas.
- c La eficiencia de recolección de la filtración por tela es realizada debido a que la MP posee una carga residual proveniente del PES.

7.4 TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA DEPURADORES

Las tecnologías emergentes para los depuradores incluyen a: 1) el depurador tipo Venturi con orificio anular y 2) el depurador con malla de red de agua. Estas tecnologías se describen a continuación.

7.4.1 Depurador Tipo Venturi con Orificio Anular

Se ha desarrollado un depurador tipo Venturi con orificio anular (*Leisegang QTV-Process, N.A.*) que es un proceso de depuración alcalina para la remoción de MP y contaminantes gaseosos. Los gases del tubo de escape primero son enfriados por inyección de un licor de cal y después depurados en un Venturi con orificio anular. La unidad no genera aguas residuales y usa el calor proveniente de los gases del tubo de escape para concentrar el residuo en una pasta con un 50 por ciento de sólidos. Este dispositivo ha sido utilizado con éxito en la incineración de aguas residuales del drenaje municipal en donde, con una caída de presión de 6 pulgadas de agua, se logró un 99 por ciento de eficiencia de control de MP $\$ 2.5 : m$. A una caída de presión del agua de 24 pulgadas, una eficiencia de control mayor del 99 por ciento para la PM $\$ 1.0 \mu m$ y el 97.5 por ciento para la MP de $0.5 : m$.¹⁸

7.4.2 Depurador de Malla de Red de Agua

Un depurador de malla de red de agua ha sido desarrollado por *Mystaire Air Pollution Control Systems, de Misonix Inc.* de Farmingdale, Nueva York, que es apropiado para muchos tipos de MP, gases, vapores, olores y neblinas. La malla de red de agua es un material de empaque para depurador extremadamente efectivo que consiste en secciones de fibra de vidrio recubierta de CPV en capas que es comprimida y unida para crear miles e pasajes Venturi en donde el gas es dispersado a la fuerza a través de líquido depurador. La malla no se obstruye y mezcla por completo al gas con el líquido depurador. Se reporta que este depurador puede manejar hasta 50,000 pies cúbicos estándar por minuto.¹⁹

7.5 TECNOLOGÍAS EMERGENTES DE RECOLECTORES MECÁNICOS

Una tecnología emergente para los recolectores mecánicos es el “Separador de Núcleo” que ha sido desarrollada por *LSR Technologies, Inc.* para usarse con la MP proveniente de la combustión de carbón. El separador de núcleo consiste de un separador centrífugo y un ciclón convencional. El separador centrífugo es una cámara cilíndrica con una entrada tangencial al fondo y dos salidas, las cuales generan un movimiento circular y fuerza centrífuga. En el Separador de Núcleo, el gas cargado de partículas entra al separador centrífugo, en donde la MP sólida es forzada hacia la pared y hacia fuera del separador centrífugo dejando al gas limpio. Este gas limpio en el centro del separador es emitido hacia la atmósfera y la porción de gas remanente cargada de polvo es enviada a un ciclón para una remoción adicional de MP. El gas limpiado proveniente del ciclón enseguida es re-circulado de

nuevo hacia el separador centrífugo. El sistema de Separación de Núcleo cuesta alrededor de tres veces más que un ciclón de tamaño equivalente, pero remueve el 80 por ciento de lo que generalmente penetra al ciclón convencional para proporcionar un control de MP del 95 al 98 por ciento en total.^{20,21}

7.6 TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA EL CONTROL DE POLVOS FUGITIVOS

Las tecnologías emergentes que pueden ser aplicables para el control de MP proveniente de las fuentes de MP fugitiva son 1) el Ionizador de MP de alto voltaje y 2) la niebla seca. Estas tecnologías se discuten a continuación.

7.6.1 Ionizador de MP de Alto Voltaje

Una técnica que utiliza pulsos eléctricos de alto voltaje para controlar contaminantes del aire ha sido desarrollada por dos compañías. Un dispositivo llamado *Ion Blast* ha sido desarrollado por *Ion Blast, Inc.* of Vantaa, Finlandia. En el *Ion Blast*, el gas es soplado hacia una cámara donde una corriente de 150 kilovoltios (KV) carga a la MP en el aire. La MP enseguida es atraída hacia una superficie de recolección en donde se adhieren. Se reporta que el dispositivo tiene requisitos de energía bajos y ninguna parte movable, desgastable o reemplazable. Se reporta que el *Ion Blast* es capaz de remover casi el 100 por ciento de la MP, incluyendo materia biológica tal como virus, tan pequeña como 0.005 : m. Solamente se pueden tratar cantidades pequeñas de gas de hasta 5000 pies cúbicos estándares por minuto.²²

Un dispositivo similar, llamado el *Pulsatech*, ha sido desarrollado por *Pulsatron Technology, Ltd.* de Los Angeles, California. La cual había implementado el dispositivo en cuatro plantas industriales rusas. Se reporta que el *Pulsatech* logra el 99 por ciento de destrucción de SO₂ y NO_x y >95 por ciento de destrucción de COV, mientras que ioniza la MP de manera que se acumula sobre las paredes de la cámara. El dispositivo usa una carga de 22 KV y tiene una capacidad de menos de 1 500 pies cúbicos estándares por minuto.²³

7.6.2 Niebla Seca

- c Un dispositivo para controlar las emisiones fugitivas de polvo de carbón proveniente de puntos de transferencia ha sido desarrollado y patentado por *Sonic Development Corp.*, de Parsippany, Nueva Jersey. En el dispositivo de "Niebla Seca", una niebla de gotitas de tamaño micrométrico es generado por boquillas. El agua humedece el carbón y desata la aglomeración de las partículas de polvo hasta tamaños suficientemente grandes como para sedimentarse. Una vez que las gotas con polvo llegan al suelo, el agua se evapora dejando carbón seco. Una unidad instalada cerca de la planta generadora de energía de una procreadora de grano usa agua a una

velocidad de 1 galón/minuto, alrededor del 10 por ciento de la que se usa en las técnicas de humedecimiento convencionales.²⁴

7.7 TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA CONTROL SIMULTANEO DE LA CONTAMINACIÓN

Las tecnologías emergentes cuyo objetivo es el control simultáneo de la MP y otros contaminantes incluyen: 1) el filtro catalítico de tela SO_x - NO_x -*Rox Box* (SNRB), y 2) filtros de tela recubiertos de catalizador. Estas tecnologías se discuten a continuación.

7.7.1 Filtro Catalítico de Tela SNRB (SO_x - NO_x -*Rox Box*)

Un filtro SO_x - NO_x -*Rox Box* (SNRB) ha sido desarrollado por *Babcock & Wilcox* (Alliance, Ohio) para usarse en la combustión del carbón, que controla la MP ("*Rox*") tanto como los SO_x y los NO_x . El dispositivo consiste de un filtro de tela con propulsión a chorro equipado con bolsas de filtro de fibras de cerámica para aplicación a temperaturas altas, inyección de sorbente alcalino (basado en sodio o calcio) usado para la remoción de SO_2 , y la inyección de amoníaco reducción catalítica selectiva (RCS) usada para la reducción catalítica y el control de los NO_x . El catalizador se localiza dentro de las bolsas de filtro (véase la sección 7.7.2 a continuación). El sorbente alcalino y la inyección de amoníaco pueden ser realizadas a las temperaturas altas del filtro de tela. La consolidación de la remoción de tres contaminantes en un dispositivo único ahorra en capital y costos de operación, y se elimina la necesidad de enfriamiento de los gases del tubo de escape. Las eficiencias reportadas son del 99.9 por ciento para la MP, el 85 por ciento para los SO_x , y del 90 al 95 por ciento para los NO_x .^{25,26}

7.7.2 Filtros de Tela Recubiertos de Catalizador

Los filtros de tela recubiertos de catalizador han sido desarrollados por *Energy & Environmental Research Center* of Grand Forks, North Dakota, and *Owens Corning Fiberglass Corporation* para usarse en fuentes de combustión. Utilizando un proceso de sólido-gel, los filtros de tela son recubiertos con un catalizador de vanadio/titanio (V/Ti). Los filtros recubiertos de catalizador pueden ser utilizados después en filtros de tela de lado caliente de uso en industrias o servicios públicos y son capaces de un control simultáneo de MP y NO_x .²⁷

7.8 REFERENCIAS PARA LA SECCIÓN 7

1. Butcher, C. Hot News in Ceramic Filters. *Chemical Engineer*. October 10, 1991.
2. Fischer, E.M. "Performance of Ceramic Fiber and Composite Filters at High Temperatures," in *Clean Air Technology News*, Institute of Clean Air Companies, Washington, DC. Summer 1995.
3. Dilger, F. Lowering Emissions - More Effective Air Pollution Control with Fine Fibre Filter Media. *Filtration & Separation*. March/April 1994.
4. Plaks, N. and B.E. Daniel. "Advances in Electrostatically Stimulated Fabric Filtration," in *Proceedings of the Seventh Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology* (EPA-600/9-89-046b). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. May 1989.
5. Plaks, N. and C.B. Sedman. Enhancement of Electrostatic Precipitation with Electrostatically Augmented Fabric Filtration. U.S. Patent No. 5,217,511. June 8, 1993.
6. ESP Newsletter. The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. March 1996.
7. Yamamoto, T., P.A. Lawless, and N. Plaks. Evaluation of the Cold Pipe Precharger. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 26(4): 639-645. July/August 1990.
8. Rinard, et al. "Development of a Charging Device for High-resistivity Dust Using Heated and Cooled Electrodes," in *Proceedings of the Third Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, Vol. II* (EPA-600/9-2-005b). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. 1982
9. Mosley, R.B., L.E. Sparks, and N. Plaks. Electro-precipitator with Suppression of Rapping Reentrainment. U.S. Patent No. 4,822,381. April 18, 1989.
10. N. Plaks and L.E. Sparks. Electro-precipitator with Alternating Charging and Short Collector Sections (SUPER ESP). U.S. Patent No. 5,059,219. October 22, 1991.
11. Plaks, N. "The SUPER ESP - Ultimate Electrostatic Precipitation," in *Proceedings: 1991 Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California. 1992.
12. Oglesby, S., Jr. Future Directions of Particulate Control Technology: A Perspective. *J. Air Waste Management Assoc.* 40(8): 1184-1185. August 1990.
13. Fabric Filter Newsletter. The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. April 1996.

14. Miller, R.L. "Combining ESPs and Fabric Filters for Particulate Collection," in *Clean Air Technology News*, Institute of Clean Air Companies, Washington, DC. Winter 1994.
15. Lamarre, L. COHPing with Particulates. *EPRI Journal*. July/August 1993.
16. Chang, R. Compact Hybrid Particulate Collector (COHPAC). U.S. Patent No. 5,158,580. October 27, 1992.
17. C. Sedman, N. Plaks, W. Marchant, and G. Nichols. Advances in Fine Particle Control Technology. Presented at the Ukraine Ministry of Energy and Electrification Conference on Power Plant Air Pollution Control Technology, in Kiev, The Ukraine, September 9 - 10, 1996.
18. The Scrubber Manual. The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. February 1987.
19. Personal communication. C. Thomas, Misonix Inc., Farmingdale, New York, with T. Stobert, EC/R Inc., Durham, North Carolina. Mystaire® Scrubbing Systems. August 6, 1996.
20. ESP Newsletter. The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. May 1996.
21. Wysk, S.R. and L.A. Smolensky. Novel Particulate Control Device for Industrial Gas Cleaning. *Filtration & Separation*. January/February 1993.
22. ESP Newsletter. The McIlvaine Company, Northbrook, Illinois. April 1996.
23. High-Power Pulses Blast Pollutants. *Chemical Engineering*. 103(9): 21-22. September 1996.
24. Reason, J. Dust Suppression System Doesn't Wet Coal. *Power*. March 1989.
25. Kudlac, G.A., et. al. SNRB Catalytic Baghouse Laboratory Pilot Testing. *Environmental Progress*. 11:1. February 1992.
26. Gennrich T. Filter Bags Help Meet Particulate Control Standards. *Power Engineering*. August 1993.
27. Ness, S.R., et al. SCR Catalyst-Coated Fabric Filters for Simultaneous NO_x and High Temperature Particulate Control. *Environmental Progress*. 14:1. February 1995.

APÉNDICE A

LISTA DE DOCUMENTOS DE RECURSO PARA EL CONTROL DE MP Y PRECURSORES DE MP

La siguiente es una lista de documentos que pueden ser usados como recursos para identificar las técnicas de control tanto para la materia particulada (MP_{10} y $MP_{2.5}$), tanto como los precursores de la MP: los óxidos de azufre, el amoníaco, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles.

MATERIA PARTICULADA

Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1 (EPA-450/3-81-005a, PB83-127498). U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1982. (change to 1996 update, when completed)

Guidance Document for Residential Wood Combustion Emission Control Measures (EPA-450/2-89-015). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1989.

Technical Information Document for Residential Wood Combustion Best Available Control Measures (EPA-450/2-92-002). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1992.

Control of Open Fugitive Dust Sources (EPA-450/3-88-008). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1988.

Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures (EPA-450/2-92-004). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 1992.

Agricultural Activities Influencing Fine Particulate Matter Emissions. Draft Final Report prepared for Mr. K. Woodard, U.S. Environmental Protection Agency, Air Quality Strategies and Standards Division, Research Triangle Park, North Carolina, under EPA Contract No. 68-D3-0031, Work Assignment II-19. March 25, 1996.

OXIDOS DE AZUFRE

Control Techniques for Sulfur Oxide Emissions from Stationary Sources, Second Edition (EPA-450/3-81-004). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. 1981.

AMONIACO

ApSimon, H.M., D. Cowell, and S. Couling. Assessing the Potential for Abatement of Ammonia Emissions from Agriculture in Europe: the MARACCAS Model (Draft). International Conference on Atmospheric Ammonia Emissions, Deposition and Environmental Impacts, NETCEN, Culham, Oxford, England. October 2-4, 1995.

OXIDOS DE NITROGENO

Meeting the 15-Percent Rate-of-Progress Requirement Under the Clean Air Act: A Menu of Options. STAPPA/ALAPCO, Washington, D.C. September 1993.

Controlling Nitrogen Oxides Under Clean Air Act. STAPPA/ALAPCO and ESI International, Washington, D.C. July 1994.

COMPUESTOS ORGANICO VOLATILES

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume I: Control Methods for Surface Coating Operations. EPA-450/2-76-028 (NTIS). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November 1976.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume II: Surface Coating of Cans, Coils, Paper, Fabrics, Automobiles, and Light-Duty Trucks. EPA-450/2-77-008. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and standards, Research Triangle Park, North Carolina. May 1977.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume III: Surface Coating of Metal Furniture. EPA-450-2-77-032. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1977.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume IV: Surface Coating for Insulation of Magnet Wire. EPA-450/2-77-033. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1977.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume V: Surface Coating of Large Appliances. EPA-450/2-77-034. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1977.

Control of Volatile Organic Emissions from Bulk Gasoline Plants. EPA-450/2-77-035. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1977.

Control of Volatile Organic Emissions from Storage of Petroleum Liquids in Fixed-Roof Tanks. EPA-450/2-77-036. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1977.

Control of Refinery Vacuum Producing Systems, Wastewater Separators, and Process Unit Turnarounds. EPA-450/2-77-025. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. October 1977.

Control of Volatile Organic Compounds from Use of Cutback Asphalt. EPA-450/2-77-037. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1977.

Control of Hydrocarbons from Tank Truck Gasoline Loading Terminals. EPA-450/2-77-026. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. October 1977.

Design Criteria for Stage I Vapor Control Systems - Gasoline Service Stations, (no document number issued). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November 1975.

Control of Volatile Organic Emissions from Solvent Metal Cleaning. EPA-450/2-77-022. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November 1977.

Summary of Group I Control Technique Guideline Documents for Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources. EPA-450/3-78-120. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1978.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume VI: Surface Coating of Miscellaneous Metal Parts and Products. EPA-450/2-78-015. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. June 1978.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume VII: Factory Surface Coating of Flat Wood Paneling. EPA-450/2-78-032. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. June 1978.

Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources - Volume VIII: Graphic Arts - Rotogravure and Flexography. EPA-450/2-78-033. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1978.

Control of Volatile Organic Compound Leaks from Petroleum Refinery Equipment. EPA-450/2-78-036. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. June 1978.

Control of Volatile Organic Emissions from Petroleum Liquid Storage in External Floating Roof Tanks. EPA-450/2-78-047. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1978.

Control of Volatile Organic Compound Leaks from Gasoline Tank Trucks and Vapor Collection Systems. EPA-450/2-78-051. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1978.

Control of Volatile Organic Emissions from Manufacture of Synthesized Pharmaceutical Products. EPA-450/2-78-029. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1978.

Control of Volatile Organic Emissions from Manufacture of Pneumatic Rubber Tires. EPA-450/2-78-030. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1978.

Summary of Group II Control Technique Guideline Documents for Control of Volatile Organic Emissions from Existing Stationary Sources. EPA-450/2-80-001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1979.

Control of Volatile Organic Compound Emissions from Large Petroleum Dry Cleaners. EPA-450/3-82-009. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. September 1982.

Control of Volatile Organic Compound Emissions from Manufacture of High-Density Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene Resins. EPA-450/3-83-008. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November 1983.

Control of Volatile Organic Compound Equipment Leaks from Natural Gas/Gasoline Processing Plants. EPA-450/2-83-007. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1983.

Control of VOC Fugitive Emissions from Synthetic Organic Chemical, Polymer, and Resin Manufacturing Equipment. EPA-450/3-83-006. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. March 1984.

Control of Volatile Organic Compound Emissions from Air Oxidation Processes in Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry, EPA-450/3-84-015. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1984.

Control of Volatile Organic Compound Emissions from Reactor Processes and Distillation Operations Processes in the Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry, draft. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November 15, 1993.

Control of Volatile Organic Compound Emissions from the Application of Agricultural Pesticides. EPA-453/R-92-011. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. 1993.

Reduction of Volatile Organic Compound Emissions from Automobile Refinishing. EPA-450/3-88-009. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. October 1998.

Halogenated Solvent Cleaners. EPA-450/3-89-030. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. August 1989.

Organic Waste Process Vents. EPA-450/3-91-007. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. December 1990.

Reduction of Volatile Organic Compound Emissions from Application of Traffic Markings. EPA-450/3-88-007. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. August 1988.

VOC/HAP Emissions from Marine Vessel Loading Operations: Technical Support Document for Proposed Standards. EPA-450/3-93-001a. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. May 1992.

APÉNDICE B

INDICES DE COSTO VATAVUK PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE VATAVUK

Vatavuk Air Pollution Control Cost Indices (VAPCCI), los Indices de Costo Vatavuk para el Control de la Contaminación del Aire (ICVCCA), son actualizados trimestralmente y publicados mensualmente en la revista *Chemical Engineering*. Para una explicación detallada del desarrollo y uso de los ICVCCA, véase la publicación *Chemical Engineering* de diciembre de 1995, páginas 88-95.

Indices de Costo Vatavuk para el Control de la Contaminación del Aire
(Primer Trimestre de 1994 = 100.0)^a

Dispositivo de Control	1995 (Promedio)	Primer Trimestre de 1996	Segundo Trimestre de 1996	Tercer Trimestre de 1996	Cuarto Trimestre de 1996 ^b	Primer Trimestre de 1997 ^b
Adsorbedores de carbón	110,7	109,2	107,5	105,2	103,9	104,2
Incineradores catalíticos	107,1	107,7	107	107,1	105,8	105,6
Precipitadores electrostática	108,2	107	107,6	108,9	108,3	108,8
Filtros ^c de tela	102,7	104	104,2	104,8	105	105,3
Centellas	107,5	104,5	104,9	105,1	105,7	105,5
Absorbedores de gases	105,6	108,6	108,2	107,1	106,9	108,7
Recolectores mecánicos	103	103,3	103,3	103,3	103,3	103,5
Sistemas de refrigeración	103	104,2	104,2	104,4	104,8	105,1
Oxidadores regenerativos termales	104,4	105,8	106	106,7	106,5	107,3
Incineradores termales	105,9	108	108	108,3	108,2	109,1
Depuradores en húmedo	112,5	111,7	110,1	109,3	109	108,3

^a Los valores del Índice han sido redondeados al décimo más cercano.

^b Todos los índices del cuarto trimestre de 1996 y el primer trimestre de 1997.

^c Para filtros de tela y recolectores mecánicos, cada valor trimestral mostrado es el promedio de *Producer Price Indexes (PPIs)*, los Indices de Precio del Productor (IPP), para los tres meses en cuestión, dividido por el promedio de los IPP para enero, febrero y marzo de 1994 (o sea, el primer trimestre de 1994)

ABSTRACTO DEL REPORTE TÉCNICO

TITULO DEL REPORTE: Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias

FECHA DEL REPORTE: 30 de septiembre de 1997

CONTRATO NO.: Contrato No. 68-D3-0034 de la EPA

CONTRATISTA PRINCIPAL: *EC/R Incorporated*, Chapel Hill, North Carolina

NO. DE ASIGNACIÓN DEL TRABAJO: III-34

OFICIAL DEL PROYECTO: Ms. Mary Wilkins

DIRECCION: *Information Transfer and Program Integration Division (MD-12), U.S. Environmental Protection Agency*
División de Transferencia de Información e Integración de Programas, Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.
Research Triangle Park, North Carolina 27711

TELEFONO: (919) 541-5229

OFICINA DEL PROYECTO: *Office of Air Quality Planning and Standards*,
Oficina de Planificación y Normas de Calidad del Aire

NUMERO DE PAGINAS: 242

CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD: No Clasificada (Ninguna Información Confidencial de Negocios).

ABSTRACTO DEL REPORTE:

Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate. Documento de Técnicas para el Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias, presenta los desarrollos recientes en el control de la materia particulada que se han puesto a disposición desde la preparación de un documento anterior titulado *Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources - Volume 1* (1982), Técnicas de Control para las Emisiones de Particulados

Provenientes de Fuentes Estacionarias - Volumen 1 (1982).

Este documento se enfoca sobre la materia particulada fina (MP_{10} y $MP_{2.5}$ - partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a unas 10 micras y 2.5 micras nominales, respectivamente. La información presentada en este documento incluye antecedentes sobre las emisiones de materia particulada; los métodos de medición para la materia particulada; los tipos de dispositivos de control de particulados, sus principios, operación y eficiencias de control; los costos y efectos al medio ambiente de los sistemas de control de materia particulada; y las tecnologías emergentes para el control de la materia particulada.

PALABRAS CLAVE/DESCRIPTORES: Contaminación del Aire, Dispositivos de Control, Materia Particulada Fina, Costos, Eficiencia de Control