

2ej. 13



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SELECCION DE EQUIPOS DE CONTROL  
DE CONTAMINANTES EN LA INDUSTRIA  
SIDERURGICA

## TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

JOSE RAUL GERARDO ARBOLEYA OLIVARES  
JUAN MANUEL GUZMAN SOSA  
ALFONSO LEAL VELAZQUEZ

MEXICO, D. F.

1979



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# SELECCION DE EQUIPOS DE CONTROL DE CONTAMINANTES EN LA INDUSTRIA SIDERURGICA

## INTRODUCCION

### CAPITULO I PRODUCCION

1.1.	Recepción, manejo y almacenamiento de materia prima . . . . .	1
1.2.	Tratamientos de la materia prima - previos a su utilización en fundición primaria . . . . .	2
1.3.	Tratamientos previos en fundición-secundaria . . . . .	4
1.4.	Clasificación de chatarra usada en fundición secundaria . . . . .	8
1.5.	Selección de pedacería de hierro y acero . . . . .	9
1.6.	Clasificación por tipos de hornos . .	13
1.7.	Diagrama de flujo de fundición <u>primaria</u> indicando puntos de emisión- de contaminantes . . . . .	17
1.8.	Diagrama de flujo de fundición <u>secundaria</u> indicando puntos de emi - sión de contaminantes . . . . .	17
1.9.	Planta peletizadora . . . . .	18
1.10.	Planta de sinter . . . . .	21
1.11.	Coquización . . . . .	23
1.12.	Subproductos . . . . .	25

### CAPITULO II EMISIONES

2.1.	Tipos de contaminantes emitidos en los procesos de fundición . . . . .	26
------	--	----

2.2.	Efectos que producen los contaminantes en la atmósfera . . . . .	36
2.3.	Factores de emisión de contaminantes en los procesos de fundición . . . . .	44
2.4.	Reglamentación existente en México para el control de los contaminantes que se producen . . . . .	49
2.5.	Reglamentación existente en algunos países del mundo para el control de los contaminantes que se producen . . . . .	55

**CAPITULO III MUESTREO**

3.1.	Métodos de muestreo de contaminantes . . . . .	59
3.2.	Métodos de análisis de contaminantes . . . . .	68

**CAPITULO IV SISTEMAS DE CONTROL DE CONTAMINANTES**

4.1.	Eliminación de los gases de desecho . . . . .	79
4.2.	Medidas de mantenimiento necesarias para evitar los contaminantes . . . . .	85
4.3.	Operaciones adecuadas para evitar los contaminantes . . . . .	90
4.4.	Equipos de control recomendados para este tipo de procesos . . . . .	92
4.4.1.	Ciclón . . . . .	93
4.4.2.	Lavadores Venturi . . . . .	96
4.4.3.	Filtros de tela . . . . .	98
4.4.4.	Precipitador electrostático . . . . .	101

**CAPITULO V EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES DE PARTICULAS PARA UN HORNO DE ARCO ELECTRICO PROTOTIPO (10 TONELADAS)**

5.1.	Ciclón . . . . .	103
5.2.	Lavador Venturi . . . . .	106
5.3.	Filtros de tela . . . . .	109
5.4.	Precipitador electrostático . . . . .	116
5.6.	Análisis económico de los diferen - tes equipos de control . . . . .	118

CAPITULO VI	CONCLUSIONES . . . . .	127
-------------	------------------------	-----

**BIBLIOGRAFIA**

## I N T R O D U C C I O N

El problema del control de emisiones gaseosas originadas en la producción de acero en la Industria Siderúrgica ha sido tratado muy superficialmente. En este estudio se plantean las posibles emisiones en cada fase del sistema de producción, su cuantificación mediante instrumentos de monitoreo y muestreo de contaminantes en las descargas y la descripción de la tecnología conocida para el control de las emisiones de contaminantes.

Tomando como requisito de diseño la actual reglamentación para el "Control de la Contaminación Atmosférica Originada por las Emisiones de Humos y Polvos", se definen las eficiencias necesarias a los equipos de control de partículas, sus dimensiones físicas y sus aspectos económicos de inversión inicial y de operación anual para dichos equipos.

A medida que el problema de la contaminación aumenta, se hace más urgente estructurar reglamentos más estrictos, a disminuir las descargas permitidas y a aumentar las eficiencias de los equipos de control de la contaminación de origen industrial.

Ante esta posible política gubernamental, la Industria Siderúrgica debe planear de antemano cuáles equipos de control de emisiones son factibles a cumplir con la futura reglamentación y al menor costo.

En este estudio se plantea como herramienta para dicha toma de decisiones una curva costo-eficiencia para los equipos de control más típicos a ser usados en la mencionada Industria Siderúrgica.

# CAPITULO I

## PRODUCCION

### 1.1. RECEPCION, MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA

Existen diversas vías de acceso de las materias primas a las plantas siderúrgicas, las cuales pueden ser: barco, ferrocarril, gabarras y en menor proporción, por medio de camiones. Exceptuando algunas materias primas tal como la cal, que se envía a su punto de almacenamiento en tolvas cerradas, casi todas se descargan en pilas o montones a cielo abierto. En este punto, tienen ya un tamaño predeterminado ya que fueron sometidas a la premolienda y al cribado en las minas, canteras o plantas de peletización.

En los procesos de transporte y almacenamiento, se tiene el problema de la formación de polvos originado por los finos contenidos en los minerales de hulla y caliza. Los polvos del mineral de hierro son óxidos de hierro, silicio, magnesio y calcio, existiendo también los polvos originados del espato flúor, el cual es usado como fundente y están formados por fluoruro de calcio, carbonato de calcio, óxido de hierro, aluminio y silicio. El polvo de carbón, es uno de los más problemáticos ya que se emite en gran cantidad debido a su reducido tamaño de recepción (12 mm o menos). Las pilas de hulla, alcanzan hasta 30 m de altura y cubren una área de 40,000 m<sup>2</sup>.

Dado que se manejan enormes volúmenes de materia prima y como la mayoría se encuentra al aire libre, se han practicado algunos procedimientos que disminuyan un poco la emisión de polvos, tales como el humedecimiento o rociado con agua o bien con plásticos especiales, pero con poco éxito. La mayor cantidad de materia prima la componen el mineral de hierro, los pellets, el carbón y la chatarra.

No obstante el avance tecnológico, en los procesos de fabricación de hierro y acero, siempre se han tenido en éstos, -

fuentes de contaminación ya sea por la aglomeración de materiales de tipo mineral, el uso de agua (en su mayoría como medio de enfriamiento y lavado), el empleo de oxígeno, etcétera. Esto provoca una emisión de humos rojos y diversos problemas de contaminación cada vez más complejos.

Los principales contaminantes emitidos por la industria siderúrgica son:

- a) Polvos de composición diversa y granulometría entre 10 y 100 micras.
- b) Partículas finas o fumos, de los cuales los más abundantes son los fumos rojos de óxido de hierro y cuyo tamaño oscila entre 0.008 y 1.8 micras. Debido a su reducido tamaño, pueden colorear enormes superficies, por ejemplo, un gramo de este fumo puede cubrir una área de 20 a 50 m<sup>2</sup>, dependiendo de su granulometría.

## 1.2. TRATAMIENTOS DE LA MATERIA PRIMA PREVIOS A SU UTILIZACION EN FUNDICION PRIMARIA

El acero es un producto básico en el desenvolvimiento económico de los países en evolución; el desarrollo de la industria siderúrgica, implica el crecimiento de la infraestructura minera en que se basa para contar con la cantidad suficiente de materias primas básicas, que intervienen en los procesos de fabricación de arrabio o hierro de primera fusión. Los principales insumos, son el carbón mineral, los fundentes, el agua y el mineral de hierro que no tiene sustituto.

Si la explotación se realiza a cielo abierto (como en el caso de la mina "La Perla" de Cd. Canargo, Coah.), ésta se lleva a efecto por medio de barrenos, los que se detonan simultáneamente, obteniéndose 1000 toneladas de mineral de hierro por cada barreno. El material resultante del tunbe, se manda a la planta de trituración si se trata de mineral o a los terreros si es material estéril.

**TRITURACION.** Se tienen dos circuitos, el de mineral pulverulento y el de mineral de trozo. El mineral pulverulento se descarga en una criba fija en donde se depositan dos fraccio-nes; una de menos de 6 mm, pasa al circuito de trituración de trozo, según el tamaño; la segunda fracción puede o no pasar por la quebradora primaria, a la que sólo llega el material mayor de 25 mm. El que se encuentra entre 6 y 25 mm, se transporta por medio de bandas a la quebradora secundaria y posteriormente al circuito de trituración.

El circuito de trituración de trozo, consta de una serie de cribas fijas y vibratorias y además de cinco trituradoras: una primaria, dos secundarias y dos terciarias, las cuales dan origen a dos tipos de material, según el tamaño, el menor de 6 mm y aquél entre 6 a 19 mm; el primero de éstos va a los patios de finos y el segundo a la planta de medio pesado.

**BENEFICIO.** Son dos los procesos que más se aplican, el de medio pesado y el de pulsadores. El proceso de medio pesado, se basa en el principio de flotación de los sólidos contenidos en un líquido, según la relación de sus densidades; es decir, el material triturado se mezcla con magnetita y agua, para formar una pulpa la cual se manda a unos tambores separadores; éstos levantan el material precipitado (concentrado con un 58% de hierro) y lo depositan en el canalón de arrastre; mientras que el material que flota y forma las colas (con 6 a 19% de hierro), es arrastrado por la corriente de medio pesado. Posteriormente, ambos productos pasan a otra sección de cribas donde se lavan con agua para recuperar la magnetita y aquí mismo se separan y clasifican de acuerdo a las especificaciones establecidas.

En el proceso de pulsadores, se hace lo siguiente: primero se seca el material, razón por la cual se deposita en una criba vibratoria; posteriormente se traslada a los pulsadores, los cuales son del tipo de diafragma y la concentración consti

tuye un tipo especial de sedimentación, que consiste en la distribución de las partículas en capas de densidades diferentes, separadas convenientemente. Los pulsadores, son depósitos de sección piramidal con placas perforadas para formar una cama inclinada. Las pulsaciones sucesivas de agua, provocan que los precipitadores desciendan hasta el fondo de la pirámide, mientras que los productos livianos o desperdicios, alcanzan el rebosadero. El material resultante de pequeño tamaño se envía al jalero y el resto a las pilas de mineral de fino o a las tolvas de carga. Las dos secciones de pulsadores tienen una capacidad de 64 toneladas cada una de ellas.

### 1.3. TRATAMIENTOS PREVIOS EN FUNDICION SECUNDARIA

Hasta los últimos años, los altos hornos han trabajado con escoria básica (índice de basicidad  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  de 1.4 aproximadamente), que producían en marcha normal, arrabio con menos de 0.06% de azufre y 0.5% de silicio. Actualmente, y por imperativos económicos, los altos hornos funcionan en marcha semineutra y ácida, con índice de basicidad de la escoria  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  de 1.0 a 1.3, lo que origina la producción de arrabios más siliciosos, lo cual hace más difícil su proceso de afinación.

Se han desarrollado procesos o tratamientos previos con el fin de reducir el porcentaje de silicio y azufre de los arrabios a un 0.5% y 0.05% respectivamente, que se consideran adecuados para la fabricación de aceros.

Se conoce como "preafinado", al proceso de eliminar el silicio del arrabio; efecto que se logra quemándolo, para lo cual se inyecta oxígeno. Existen varios métodos para el preafinado:

- a) Preafinado en cuchara. Se realiza inyectando oxígeno en el metal contenido en una cuchara de colada por medio de una lanza.

Se usan cucharas de 30 a 45 toneladas y cargadas con 20 a 30 toneladas para evitar desbordamientos. Las lanzas son de hierro dulce de 12 a 18 mm de diámetro. Las cucharas se colocan previamente bajo campanas para la aspiración de los "fumos rosas", que se producen inevitablemente. (ver figura 1.3.1).

Antes de iniciar el soplado, se adicionan al baño 1,500 Kg. de chatarra la cual se utiliza como medio refrigerante para controlar térmicamente la operación; - 250 Kg. de cal, ésta tiene por objeto la formación de una escoria suficientemente básica para limitar las pérdidas de hierro en forma de FeO en la escoria y combatir el espumado; además de 25 Kg. de fluorita.

El oxígeno se sopla a una presión de 7 a 12 Kg/cm<sup>2</sup> con caudales de 0.3 m<sup>3</sup>/min/ton, y la operación dura aproximadamente 20 minutos. Este preafinado se realiza al arrabio de 0.75 a 1.5% de silicio; pero si este porcentaje es superior, se realizan dos descoriados por separado con nuevas aportaciones.

- b) Preafinado con mezcladores activos.
- c) Preafinado con oxígeno en los mezcladores.
- d) Preafinado continuo en el canal de colada.
- e) Proceso Brymbe.

El azufre se elimina transformando los sulfuros solubles en el baño en sulfuros insolubles que flotan y se retiran con la escoria.

Los principales procesos desulfurantes son:

**DESULFURACION CON CARBONATO DE SODIO.** El carbonato de sodio es uno de los desulfurantes más empleado; y, no lo es puro, sino que está formado por una mezcla de carbonato y bicarbonato de sodio y en ocasiones, carbonato de potasio, por eso es frecuente que industrialmente se le llame también carbonato de sosa.

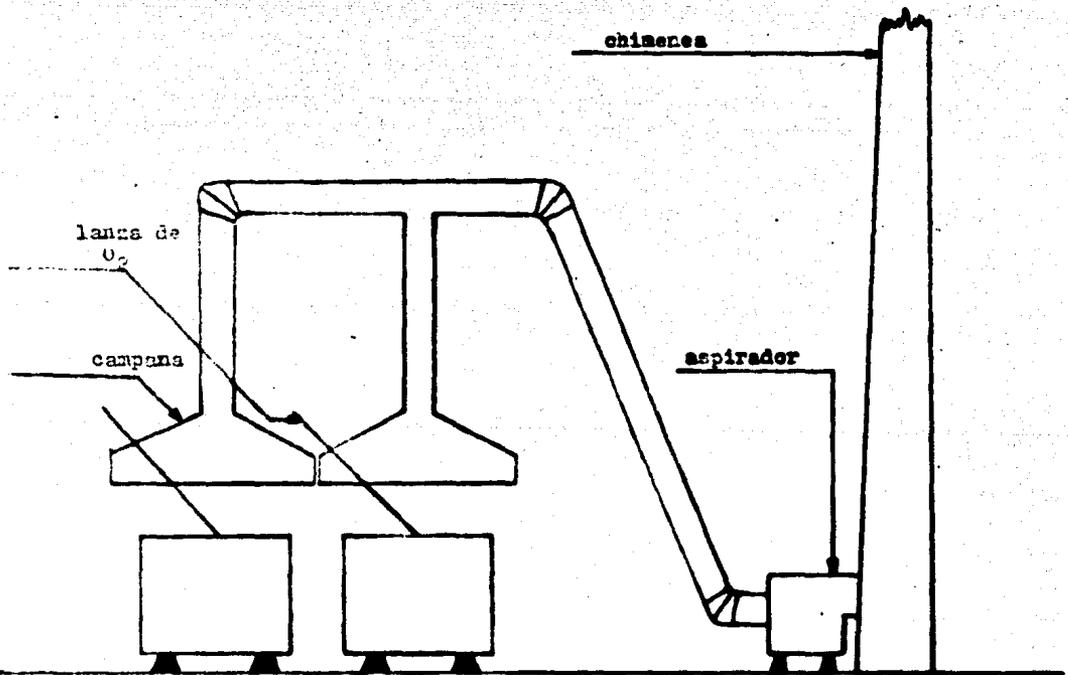
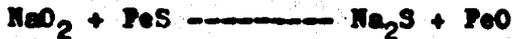
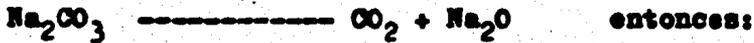
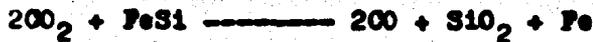


Figura 1.3.1. Preadfinado en cuchara

El carbonato de sodio en contacto con el arrabio se disocia:



Además el  $\text{CO}_2$  formado en la descomposición del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el  $\text{FeO}$  reaccionan con el  $\text{FeSi}$ , teniéndose:



Por lo tanto, el carbonato de sodio es desulfurante y desiliciante. La operación por lo regular se desarrolla colando el arrabio sobre el carbonato de sodio colocado en la cuchara previamente o al mismo tiempo.

En la práctica, con 5Kg. de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por tonelada de arrabio se obtiene una desulfuración del 30 al 50%, pero se presentan ciertos inconvenientes que son:

- a) Enfriamiento del arrabio de 40 a 80 grados centígrados.
- b) Se reduce la vida del refractario a un tercio de lo normal.
- c) Se dificulta eliminar la escoria ya que es muy fluida.
- d) Se producen fumos tóxicos y desagradables.

Para eliminar estas fallas, se aplican técnicas tales como:

no:

- a) Fusión preliminar del carbonato de sodio.
- b) Doble desulfuración.
- c) Desulfuración en sifón.
- d) Proceso Casal.

Aparte del proceso de desulfuración con carbonato de sodio, existen los siguientes:

**FUSION PRELIMINAR DEL CARBONATO DE SODIO.**

**DOBLE DESULFURACION CON CARBONATO DE SODIO.**

**DESULFURACION EN SIFON CON CARBONATO DE SODIO.**

**DESULFURACION POR EL PROCESO GAZAL.**

**DESULFURACION CONTINUA CON CARBONATO DE SODIO.**

**DESULFURACION CON SOSA CAUSTICA.** La cual consta de dos procesos:

- a) Proceso Byers.
- b) Proceso Diamond Alkali.

**DESULFURACION CON CAL.** La cual básicamente consta de tres procesos:

- a) Proceso Kalling.
- b) Proceso de la cuchara giratoria.
- c) Proceso TWA.

**DESULFURACION CON CAL, INYECTADA CON LANZA.** El problema con la cal era que su punto de fusión ( $2570^{\circ}\text{C}$ ), es más elevado que el de los arrabios, por lo que habría que buscar procedimientos para aumentar el contacto de la cal sólida con el metal fundido y además, si no se emplean fundentes, se producen escorias sólidas.

Existen también los procesos Perrin; éstos son procedimientos suplementarios a los procedimientos Bessemer y Siemens Martín, para completar la desfosforación o desoxidación del acero.

Después de obtenido el arrabio o fundición primaria no es posible usarlo directamente en los moldes ya que carece de

ciertos requisitos mecánicos y tecnológicos que son requeridos; consecuentemente, los lingotes de arrabio vuelven a fundirse - con algunos elementos con el fin de eliminar las anteriores de deficiencias, se funde también material conocido como chatarra y éste es el procedimiento que se conoce como "fundición secundaria".

#### 1.4. CLASIFICACION DE CHATARRA USADA EN FUNDICION SECUNDARIA

La chatarra usada en el proceso denominado como fundición secundaria, puede clasificarse como sigue:

- a) Chatarra de fábrica o coladas.
- b) Pedacería de hierro colado comprada.
- c) Pedacería de acero.

a) La chatarra de fábrica, siendo de análisis conocido y uniforme forma una clase de material deseable de fusión. En muchos casos, toda la pedacería producida en una fundición y la cantidad de chatarra de fábrica procedente del departamento de fusión variará con el rendimiento de piezas útiles producidas. En esta clasificación, están el lote de piezas producidas con algún defecto, coladas y cargadoras que intervienen en el proceso de fundición. Este tipo de pedacería, puede verse aumentado por la procedente del taller de maquinado y de los rechazos de piezas fundidas o bien por virutas comprimidas (embriquetadas) procedentes de otro proceso.

b) La pedacería de hierro colado, comprende partes de maquinaria que han cumplido con su vida útil y ya no es utilizable.

Dada la gran cantidad de materiales, difiere mucho en tamaño y análisis químico de la chatarra de fábrica. Afortunadamente, las piezas de hierro colado son fabricadas conforme a u

na gama de análisis lo suficientemente uniforme y estándar que las hace fácilmente identificables, ya sea por sus especificaciones de demanda o porque la producción de ciertos artículos, es bien delimitada a una cierta zona geográfica de la que se conocen los materiales de fusión disponibles.

c) La pedacería de acero existe también en gran cantidad y variedad dependiendo básicamente de la función a que serán sometidos. Este tipo de pedacería es con frecuencia material nuevo, de análisis conocido de algún proceso de fabricación, los talleres de forja y atados de varilla comercial, son típicos de este tipo de pedacería la que se sobrevalúa por su análisis conocido y por su limpieza, proceden también del desmantelamiento de estructuras antiguas o en desuso y de maquinaria gastada o fatigada.

## 1.5. SELECCION DE PEDACERIA DE HIERRO Y ACERO

Las observaciones siguientes, no son todas ni las más importantes pero, en términos generales, nos indicarán de manera útil el análisis aproximado de un determinado lote de material.

### PEDACERIA DE HIERRO COLADO:

1. Aquellas piezas que muestren evidencias de haber sufrido operaciones de mecanizado, tendrán la cantidad suficiente de carbono y silicio para dar una fractura gris en las secciones que muestren el mecanizado. Las piezas ligeras, contendrán un mínimo de 3.4% de carbono y 2.0% de sílice. Las de mediano espesor, un mínimo de 3.1% de carbono y 1.5% de silicio y las muy gruesas, contienen aún menos silicio, hasta 1.25%.

2. Las piezas automotrices son de bajo contenido de fósforo, con un promedio de 0.15%, uniformes en contenido de silicio, de 2 a 2.5% en cilindros y hasta 2.5% en partes livianas. Los bloques de motores de camiones de servicio, contienen 2.0% de

de níquel, 0.75% de cromo y 0.5% de molibdeno. La compra de piezas coladas que han pertenecido a automóviles es probablemente la manera más segura de controlar el contenido de fósforo de la chatarra a un nivel bajo.

3. Las piezas coladas procedentes de maquinaria agrícola por lo general están libres de aleaciones y se encuentran un poco por encima del contenido de fósforo de 0.25 a 0.40%, y también más altas en contenido de carbono y silicio con promedio de un 8.4% y 2.3 a 2.5% respectivamente.

4. Las piezas templadas o que demuestran fractura blanca contienen poco silicio casi invariablemente, por ejemplo las piezas de ferrocarril, con 3.5% de carbono, 0.55% de silicio, 0.30% de fósforo y forman un tipo excelente de chatarra si se corrige su bajo contenido de silicio.

5. Las piezas de sección delgada, como piezas huecas, senitas, radiadores, planchas de cocina, etc., son de alto contenido en silicio y fósforo.

6. La pedacería quemada o muy oxidada como calderas, cajas de horno, cajas de recocido, etc., contienen poco carbono y silicio, y altas en azufre. Consecuentemente, son peligrosas ya que introducen en el cubilote mucho óxido indeseable. Si se usan, se obtiene como resultado un templado en la cuña profundo y errático y existe la probable aparición de piezas rotas o hendidas.

7. La pedacería colada como zapatas de freno de ferrocarril, cortinas de acero y muchas piezas de hierro blanco, se funden con la chatarra más corriente y nunca se usan en fundición de maquinaria que posteriormente será sujeta a especificaciones.

8. El hierro maleable tiene un análisis de 2.0% de carbono y 1.5% de silicio. Para ciertos usos es un excelente material de fusión, pero no es recomendable su mezcla en la producción de-

hierro gris, ya que contiene poco carbono y silicio.

9. El material que muestra ductilidad y se dobla al ser golpeado es acero, hierro forjado o hierro maleable. Una gran cantidad de estos materiales son peligrosos por su amplia variedad de análisis comparado con el hierro gris. Por lo general una mezcla de hierro maleable, hierro colado y acero no deben emplearse en gran cantidad para una carga destinada a producir metales para piezas que requieren calidad controlada.

10. Generalmente las piezas no corrosivas o que no responden a la fuerza de atracción de un electroimán, son de gran contenido en aleaciones, ya sea que pertenecen al tipo de inoxidable con 20% de cromo, 10% de níquel o acero al manganeso con 13% de éste o de hierros de alta aleación. Es poco común encontrar esta pedacería en la del tipo "seleccionada".

11. Los materiales no ferrosos, tales como el aluminio, aleaciones de cobre, metales antifricción, etc., no deben figurar entre el material seleccionado para carga; igualmente partes galvanizadas o estañadas, cemento, concreto, etc., ya que estos materiales introducen gran cantidad de azufre y afectan la calidad de la carga.

#### PEDACERIA DE ACERO:

1. El acero estructural es generalmente sin aleación y contiene poco carbono, aproximadamente 0.20%; 0.50% de manganeso; 0.50% de azufre y fósforo y el contenido de silicio es muy bajo.

2. Las planchas de barcos, tanques y otras placas comúnmente usadas, dan un análisis de 0.25% de carbono, 0.75% de manganeso 0.35% de silicio, 0.04% de fósforo y 0.05% de azufre.

3. La pedacería de lámina y soleras dan un análisis de 0.10% de carbono, 0.40% de manganeso, y bajo contenido en silicio, -

**fósforo y azufre.**

4. Los rieles de ferrocarril son de acero con alto contenido de carbono sin aleación, y dan un análisis de 0.70% de carbono 0.75% de manganeso, 0.10% a 0.23% de silicio.

5. Las planchas y barras de unión de rieles de ferrocarril son de acero no aleado, de bajo o medio contenido de carbono, con un mínimo de 0.11% de fósforo.

6. Los bastidores de chasises automotrices así como ruedas y aros están hechos de acero no aleado, de bajo contenido de carbono; las defensas en algunos casos de aceros de alta resistencia y bajo contenido en aleación con cantidades de silicio de hasta 0.80% y 0.60% de cromo.

7. Los cigüeñales generalmente son de acero con 0.45% de carbono y no aleados. Sólo los cigüeñales de servicio pesado se emplean altamente aleados.

8. Las muelles y resortes de ferrocarril son de acero no aleado de alto carbono; lo mismo sucede con las muelles o balles - tas de automóviles, pero en ocasiones contienen ciertas cantidades de cromo, níquel, molibdeno y vanadio.

9. Las piezas de forja pueden ser de acero al carbón sin aleación pero, en aplicaciones de servicio pesado se emplean aceros aleados de diversos tipos.

10. Las piezas de acero que han sido sometidas a varias operaciones de maquinado están hechas de acero de fácil trabajo con un contenido en azufre de 0.08% a 0.30%. Tales aceros son por lo general altos en manganeso, ocasionalmente hasta un 1.30%.

Una vez seleccionada la chatarra, se procede a un análisis químico para verificar el material dudoso. El control respecto al tamaño y espesor de la pedacería es tan importante, - como el control en el análisis químico.

Los metales no ferrosos son también altamente contaminantes y entre ellos se encuentran: bismuto, boro, cadmio, plomo,

telurio, estaño, zinc.

## 1.6. CLASIFICACION POR TIPOS DE HORNOS

Los hornos tienen por objeto proporcionar al metal el calor suficiente para fundirlo y recalentarlo hasta adquirir la fluidez requerida para adoptar la forma del molde. Podemos dividirlos en tres clases:

- a) Hornos de combustible.
- b) Convertidores.
- c) Hornos eléctricos.

a) Los hornos de combustible se dividen en dos categorías:

- 1) Hornos en los que el metal y el combustible están separados.
- 2) Hornos en los que el metal y el combustible están en contacto.

1.1 Hornos de crisol fijo de coque, combustóleo o gas.

Es el tipo de horno más sencillo y no se utiliza para el acero, puede emplearse en donde se trabaje con hierro fundido, para coladas pequeñas y urgentes. El crisol es el elemento más importante compuesto de grafito de ceilán con la adición eventual de carborundum mezclado con aglutinantes adecuados.

1.2. Hornos de reverbero. Se constituyen de un hogar, una plaza o laboratorio con solera y bóveda y una chimenea. La carga metálica se coloca en la bóveda para su calentamiento; como combustible se usa la hulla, grasa de llama larga o sea con alto contenido de sustancias volátiles, polvo, carbón, petróleo, gas de coque y metano. El horno Siemens-Kar - tin es un ejemplo clásico del horno de reverbero -

con recuperación de calor.

b) Los convertidores se utilizan con frecuencia en las fundiciones de acero pequeñas y medianas y en los talleres que trabajan con hierro colado. La operación se basa en el hecho de que el hierro colado líquido se transforma en acero inyectando aire a presión en la masa metálica. Los hierros colados aptos para el convertidos pueden ser:

- 1) Hierros colados salidos del cubilote.
- 2) Hierros colados salidos del alto horno.

El carbono, el silicio y el manganeso contenidos en el hierro colado, al entrar en contacto con el oxígeno del aire, arden; el calor generado en esta reacción no sólo mantiene líquida la masa sino que la recalienta. Los productos de la combustión del silicio y el manganeso forman la escoria y los del carbono forman los gases (CO) que arden en la boca del convertidor. La capacidad de los convertidores varía de 1 a 1.5 toneladas.

Cuando el recubrimiento del aparato es ácido, el horno y el ácido se llaman Bessemer; si es básico, reciben el nombre de Thomas. Los convertidores utilizan como fuente de calor la combustión de algunos de los elementos de la aleación.

c) Los hornos eléctricos se dividen en tres categorías:

- 1) Hornos eléctricos de arco.
- 2) Hornos eléctricos de inducción.
- 3) Hornos eléctricos de resistencia.

1) El horno eléctrico de arco puede ser:

1.1 Horno eléctrico de arco directo trifásico. El cual se compone de:

CRISOL. Constituido por un recipiente de plancha soldada o remachada con dos aberturas; una para la

carga y otra para la colada (piguera).

**BOVEDA.** Es de material refractario y tiene tres aberturas para el paso de los electrodos.

**ELECTRODOS.** Son de antracita calcinada, de coque y de grafito, ya que deben soportar elevadísimas temperaturas y ser altamente resistentes a la corrosión producida por las escorias.

**BRAZO PORTAELECTRODOS.** Sostiene a los electrodos.

**TRANSFORMADOR.** La corriente llega a los hornos desde la línea de distribución de alta potencia, por ejemplo de 13,000 a 22,000 volts, y con adecuados transformadores, es reducida hasta un rango de 60 a 220 volts, y en hornos grandes, hasta 350 volts.

**REGULADOR AUTOMÁTICO.** Es un dispositivo que asegura la absorción de una potencia constante y elimina las variaciones bruscas de corriente y las consiguientes oscilaciones que perturban gravemente la red de alimentación.

1.2 Horno eléctrico de arco indirecto. Son parecidos a los hornos eléctricos de electrodo radiante sólo que los electrodos son dos, regulables en sentido horizontal hasta que entre sus puntas se forma un arco eléctrico, que nunca estará en contacto con el metal.

2) En el horno eléctrico de inducción se distinguen dos tipos:

2.1 Horno de inducción de baja frecuencia. En el que se aprovechan fenómenos de inducción mediante un devanado dentro del cual la materia que se ha de calentar constituye el secundario de una bobina de inducción.

2.2 Horno de inducción de alta frecuencia. En este ca-

so se rodea el crisol con una bobina solenoide hecha de tubo de cobre por la cual circula agua.

3) Dentro de los hornos eléctricos de resistencia tenemos:

3.1 Horno eléctrico de resistencia no metálica. Este es un horno oscilante de tambor, apoyado sobre rodillos provisto de puerta de carga y de piqueta de colada. La corriente llega por una línea monofásica de 500 volts y se reduce a 75 volts. El calentamiento se obtiene por medio de un electrodo cilíndrico de grafito artificial instalado sobre el eje de la cámara del horno.

3.2 Horno eléctrico de resistencia metálica. En este horno el calor es producido por la corriente que recorre los hilos o cintas de aleaciones metálicas especiales, envueltas en espiral o dobladas en "S" con el fin de que puedan desarrollar la máxima longitud en el mínimo espacio.

Además de los hornos vistos anteriormente, tenemos uno muy importante:

Horno de cubilote. Es el más usado en la fundición de hierro y también se le conoce como "horno de manga o cúpula".

El cubilote funciona con combustible sólido y en éste, la carga metálica, el combustible y el comburente están en íntimo contacto; esto permite un intercambio térmico directo y consecuentemente un rendimiento elevado.

El cubilote se compone de las partes siguientes:

**ENVOLTURA CILINDRICA.** De eje vertical, en chapa de hierro soldada.

**REVESTIMIENTO INTERNO.** En material refractario; entre éste y la envoltura se deja una capa intermedia de unos dos centímetros rellena de arena seca para permitir las dila-

taciones radiales y axiales del refractario.

CHIMENEA. Para conducir los gases producto de la combustión, ocasionalmente se agrega un parachispas.

BOCA DE CARGA. Para introducir la carga.

CAMARA DE VIENTO. Circunda la envoltura dentro de la cual pasa el aire (enviado por un dispositivo adecuado) para la combustión.

TOBERAS. Conducen el aire al interior del cubilote.

EVACUADOR DE ESCORIA. Abertura dispuesta a unos 15 o 20 centímetros por debajo del plano de las toberas destinada a la evacuación de la escoria, la cual, por ser más ligera, flota sobre el hierro colado líquido.

CANAL DE COLADA. Parte de la piquera y con una ligera inclinación, de aproximadamente  $10^{\circ}$ ; hace caer el hierro en el caldero de la colada.

SOLERA O FONDO DEL CUBILOTE. De arena de fundición, inclinada hacia la piquera, que puede cerrarse con un portillo de descarga de uno o dos batientes, que se abren hacia abajo por medio de un cerrojo.

COLUMNAS DE APOYO. Son de hierro o fundición y están soportadas por unos cimientos de hormigón.

CRISOL. Es la parte inferior del cubilote comprendida entre la solera y el plano de las toberas.

#### 1.7. DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNDICION PRIMARIA INDICANDO PUNTOS DE EMISION DE CONTAMINANTES.

Ver figura 1.7.1

#### 1.8. DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNDICION SECUNDARIA INDICANDO PUNTOS DE EMISION DE CONTAMINANTES.

Ver figura 1.8.1

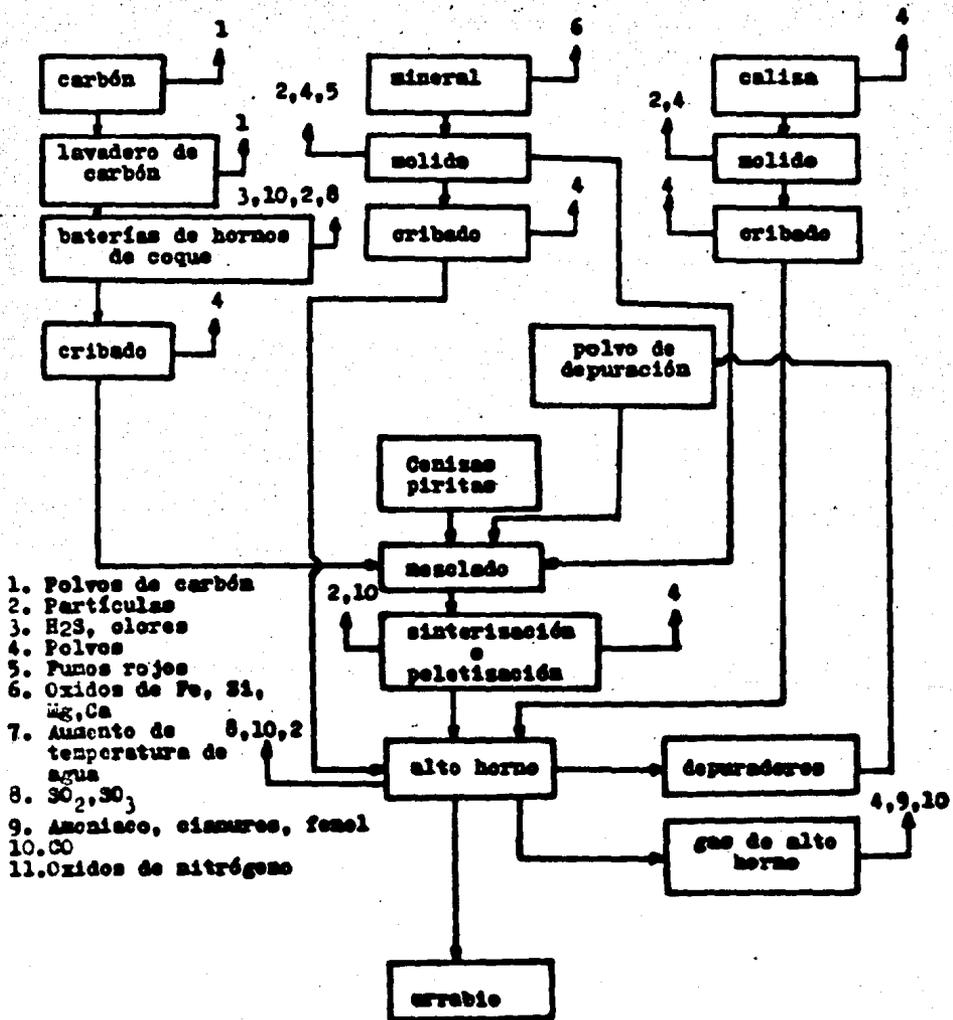


Figura 1.7.1. Diagrama de flujo de fundición primaria indicando puntos de emisión de contaminantes

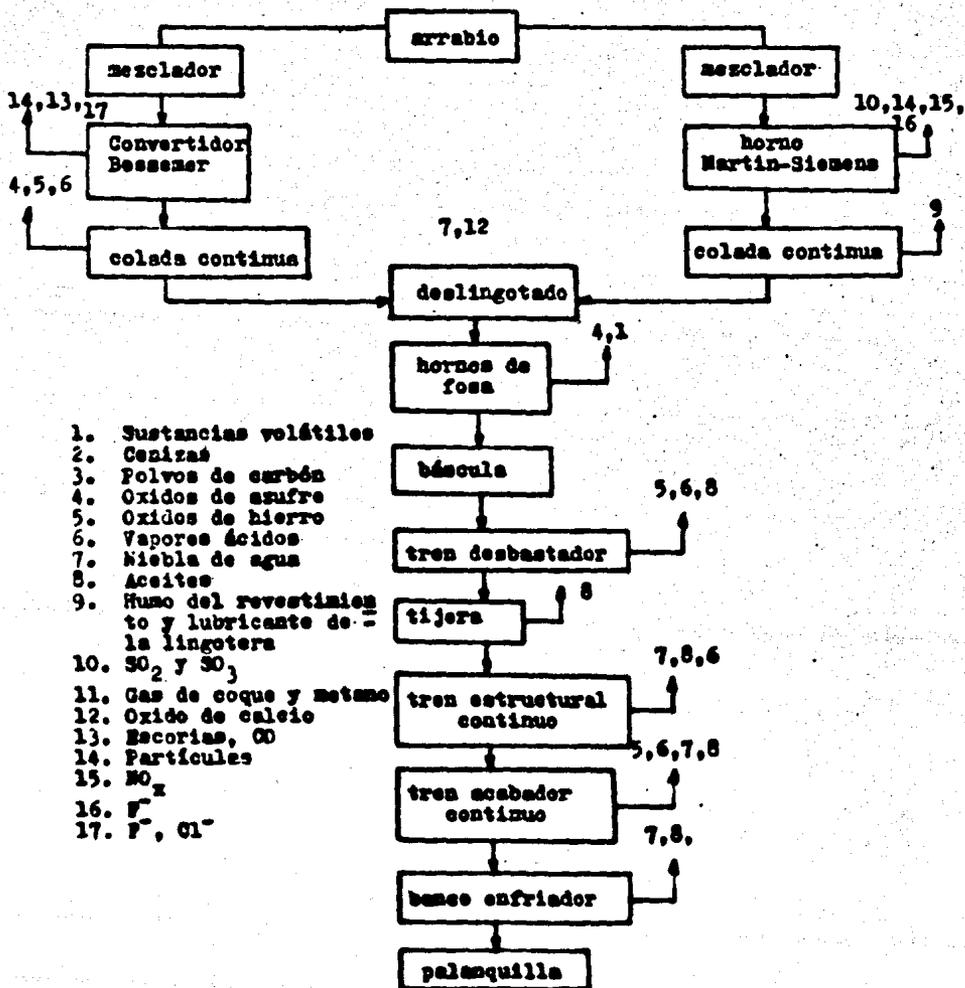


Figura 1.8.1. Diagrama de flujo de fundición secundaria indicando puntos de emisión de contaminantes.

## 1.9. PLANTA PELETIZADORA

En vista que se tienen varios tipos de mineral macizo de alta ley y que puede cargarse directamente al alto horno, pulvurulento con más de 50% de hierro y mineral diseminado de 39- a 40% de hierro y con 1 a 2% de azufre en forma de yeso y con 0.3% de fósforo. De tal forma que ni el pulvurulento por su alta proporción de ultrafinos ni el diseminado por su alto contenido de azufre, pueden utilizarse en forma directa y la forma más conveniente de aprovecharlos es la de convertir tales minerales en pelets. La planta de peletización en conjunto se compone de:

a) Sección de preparación y concentración de los minerales que se extraen de la tierra.

El mineral diseminado y pulvurulento que se extrae de la mina, que se tritura y criba a los tamaños requeridos (19 mm y 5mm respectivamente), se manejan por medio de bandas transportadoras hacia un carro aplilador que forma dos pilas de almacenamiento con cada uno de los minerales (16,000 ton. del diseminado y 9,200 ton. del pulvurulento). Estos minerales son llevados a dos tolvas receptoras, de donde, mediante dos transportadores, se cargan las tolvas de los molinos de bolas.

Con el mineral diseminado, se alimenta uno de los molinos de bolas, en circuito cerrado con tres ciclones clasificadores y el producto clasificado resultante entra a separación magnética, obteniéndose así un concentrado de alta calidad con más de 65% de hierro. El producto no magnético se deslama por medio de dos baterías de ciclones pasando luego a un espesador el cual alimenta, a partir de su descarga a la flotación que comprende dos acondicionadores dispuestos en serie donde se añade ácido sulfúrico y ácido oléico, pasando luego a cuatro celdas de flotación primaria, para obtener un concentrado pri-

mario y colas que se desechan; el primero prosigue a tres celdas limpiadoras que producen el concentrado final y "medias" - que retornan a las celdas primarias.

Los concentrados tanto magnéticos como de flotación, se llevan junto con el mineral pulvurulento a un molino de bolas de remolienda en un circuito cerrado de tres ciclones clasificadores donde se obtiene un producto que se almacena en el espesador de concentrados de tal forma que la pulpa espesa, pasa a un tanque de almacenamiento, manteniéndose en agitación constante por medio de un propulsor para evitar asentamientos.

#### b) Sección de filtrado y boleo.

La pulpa del tanque de almacenamiento se bombea a un distribuidor que alimenta por partes iguales a dos filtros de disco, descargando ambos la torta con 10 a 12% de humedad a dos tolvas de donde, por medio de dos alimentadores de disco giratorio y dos bandas transportadoras con báscula para el control de carga, se abastecen los mezcladores; adicionando previamente una proporción de bentonita o de cal hidratada o de ambas, como aglutinante de acuerdo con las características de acidez o basicidad que se quieren impartir a los pellets. El producto de bidamente mezclado y homogeneizado, descarga en dos discos pelletizadores de 5.50 m de diámetro y de inclinación y velocidad de giro variables.

El concentrado con una molienda nominal de 50% de menos - 325 mallas, con una superficie específica o blaine de 1,308 - centímetros cuadrados por gramo, ofrece buenas características de filtrado. Al aumentar la finura nominal hasta cerca de un - 64% de menos 325 mallas y el correspondiente blaine a 1650 centímetros cuadrados por gramo, disminuye la velocidad de filtrado en un 10% aproximadamente en igualdad de condiciones de unid de la torta. Por lo anterior y para disminuir la humedad de los filtros, se instala una criba curva en la descarga del -

transportador que alimenta al molino remolador para disminuir el por ciento de los ultrafinos contenidos en el mineral pulverulento y evitar su remolienda, la que daba lugar al incremento de la fracción de menos 325 mallas que llegaba al sistema de filtrado. Es de hacerse notar que las dos proporciones de finos señalados bolean bien, e igualmente la resistencia a la compresión de los pelets formados en uno y otro caso, quedan dentro de las especificaciones establecidas, si bien los pelets verdes producidos con el material más fino resultan más resistentes. Así, parece que la resistencia de los pelets verdes es función de los finos del concentrado o de la finura de este, independientemente del tipo y cantidad de aditivos que se usen; pero tomando en cuenta que el exceso de bentonita si fuese éste el aglutinante usado, provoca problemas posteriores en el alto horno.

c) Parrilla circular.

Los pelets procedentes de la sección de boleo pasan a una criba vibratoria que elimina los tamaños menores de 6 mm, y los mayores de 16 mm se descargan e inician un nuevo ciclo.

Los pelets crudos de tamaño normal (6 mm a 16 mm) se depositan mediante un transportador de banda reversible y de velocidad variable en la parrilla circular a medida que ésta gira. El área de trabajo de la parrilla circular está dividida en varios sectores que corresponden a los procesos de carga, secado, cocimiento, enfriamiento y descarga. Las zonas de secado, cocimiento y enfriamiento están separadas entre sí por mamparas refractarias.

La sección de cocimiento se subdivide a su vez en tres zonas que son: precalentamiento, ignición y postignición, separadas igualmente por dos mamparas refractarias. El calor se obtiene de la combustión de petróleo de tres quemadores repartidos: dos en el sector de precalentamiento y uno en el de encen

dido. En la etapa final del proceso, los pelets son enfriados con aire ambiental suministrado por un ventilador de tiro forzado, que proporciona suficiente presión para reducir los gases del proceso a través de la cama de pelets en las zonas de enfriamiento y cocido, removiéndose en ésta última el aire caliente por medio de un ventilador de tiro inducido después de pasar por la sección de precalentamiento. Las temperaturas de los diferentes sectores o zonas de la parrilla que producen la consolidación de los pelets, son como sigue:

Secado -----	260 a 371 °C
Precalentamiento -----	371 a 871 °C
Ignición -----	1,093 a 1,371 °C
Postignición -----	760 a 871 °C
Enfriamiento -----	174 °C

Los pelets cocidos, en tamaños que fluctúan entre 6 y 12-mm, con una resistencia mínima a la compresión de 230 Kg/cm<sup>2</sup>, son removidos de la parrilla circular por un sistema de descarga de polea-cuchara rotatoria, que los vuelca en una banda transportadora que se comunica con otra que conduce los pelets a una pila de almacenamiento de 3,500 toneladas de capacidad, a partir de la cual mediante un sistema de banda y tolva de descarga se embarcan en carros de ferrocarril. Los pelets a partir de los minerales del yacimiento, tienen el siguiente contenido medio:

Pierro -----	63.00%
Azufre -----	0.1 %
Fósforo -----	0.22%
Sílice -----	4.40%

### 1.10. PLANTA DE SINTER

Las grandes cantidades de finos que se producen inevitablemente durante la extracción y trituración de minerales y en

las diferentes operaciones de una planta siderúrgica, no pueden usarse como tales; por lo tanto se requiere aglomerarlos para su aprovechamiento en el alto horno. En las plantas de sinterización es posible aprovechar los finos producidos en las minas, el polvo de los colectores del alto horno, el polvo de los decantadores de los lavadores del gas del alto horno, la escama de los sistemas de desoxidación de los molinos y ciertas escorias de recuperación, mejorándose así el rendimiento general de la materia prima en la elaboración del arrabio o hierro de primera fusión. Con éste proceso, mediante una fusión incipiente, una mezcla de finos de mineral de hierro, polvo del alto horno, dolomita, caliza y coque, se transforma en una masa porosa; la cual luego es quebrada en pedazos, cuyo tamaño permite usarlos eficientemente en el alto horno. El producto de éste proceso se llama sinter y sus características tanto físicas como químicas, deben ser homogéneas para que el proceso de reducción resulte igualmente homogéneo. Las principales materias primas para la conformación del sinter son:

- a) Mineral de hierro.
- b) Coque.
- c) Fundentes.

El proceso de sinterización, consiste en colocar sobre una parrilla la mezcla homogénea de minerales finos, combustibles, fundentes y los finos de retorno producidos durante el cribado del sinter dentro de la planta. La capa superficial de las partículas finas, es aglomerada por una transferencia de calor y una fusión incipiente de la masa. El calor se genera al quemarse el combustible sólido mezclado con los fundentes y el mineral fino por aglomerar. La combustión se inicia quemando el combustible expuesto en la superficie por lo que se origina una zona estrecha de alta temperatura que se mueve a través de la carga, por medio de un abanico de inducción colocado en la parte inferior de la carga.

Dentro de esta zona, la superficie de las partículas adyacentes llega a la temperatura de fusión y la ganga forma una escoria semilíquida. La unión se efectúa por la fusión, el crecimiento del grano y la formación de la escoria mencionada.

El combustible y los fundentes generan gases que hacen que el material resulte poroso y el aire que entra, enfría y solidifica los bordes posteriores de la zona de combustión que avanza.

El producto consiste en una masa celular de mineral unido a una matriz de escoria. Durante el proceso, el aire de inducción es precalentado por el sinter a una temperatura superior a la de la zona de combustión y fusión y el calor del producto de la combustión, así como el exceso de aire, son cedidos a la parte interior de la zona de fusión. Debido a esto, existe una distribución de temperaturas a través de la capa formándose una serie de tonos de características físicas y químicas diferentes que son:

- a) Zona de sinter.
- b) Zona de combustión y fusión.
- c) Zona de calcinación.
- d) Zona de precalentamiento y secado.
- e) Zona húmeda.

### 1.11. COQUIZACION

En este proceso, el carbón pasa a una banda transportadora que lo conduce al patio de carbón. Se tritura, clasifica y se le separan las partes metálicas, después se le transporta a una tolva de compartimientos en donde se almacenan varios tipos de carbón según su procedencia para después mezclarlos en la proporción deseada y almacenar la mezcla en una torre situada sobre los hornos de coque.

La operación de los hornos de coque se puede dividir en -

tres fases principales:

- a) Carga de carbón al horno vacío.
- b) Coquización.
- c) Descarga del coque.

a) Carga de carbón. Esta operación la realiza una máquina cargadora provista de tolvas que toma el carbón de la torre de mezcla y lo pesa con el fin de tener un control de la carga de cada horno. Una vez llena la máquina, se desplaza por una vía en la parte superior de los hornos, hasta el que se encuentra vacío y lo llena por gravedad, regresando por una carga adicional.

b) Coquización. Tan pronto como se carga el carbón en el horno caliente, el material en contacto con las paredes se calienta; cuando alcanza el punto de fusión, una capa de carbón se suaviza y se funde. Las reacciones de destilación destructiva se suceden rápidamente en la capa plástica con una copiosa producción de productos volátiles. Continuando las reacciones, aumenta la temperatura de la zona fundida en forma rápida. La plasticidad comienza a decrecer y finalmente, la capa plástica se solidifica.

El coque que se forma después de la solidificación todavía contiene una cantidad considerable de materia volátil; pero como se mantiene la temperatura, las reacciones de la destilación destructiva continúan con evolución de gas y un poco de alquitrán.

El tiempo necesario para la transformación del carbón en coque, es aproximadamente de 18 horas. Los gases que se desprenden son colectados y enviados a la planta de subproductos para su posterior procesamiento.

- c) Descarga del coque. La descarga de los hornos se reali

za con la ayuda de tres máquinas auxiliares: máquina desahogada, máquina guía y máquina o carro de apagado.

La primera quita la puerta del llamado "lado máquina" e - impulsa al coque usando un vástago que recorre todo el largo - del horno, más lo ancho del carro guía, quita la puerta del lado opuesto, llamado "lado coque" y coloca una extensión de las paredes del horno. Al ser empujado el coque por la máquina, - cae en la caja del carro de apagado, transportándolo éste último a una torre en donde se rocía con agua.

El coque apagado se descarga en una rampa donde se evapora parte de la humedad. Después se transporta a la planta trituradora y clasificadora. Finalmente el coque es acarreado por medio de una banda a los altos hornos.

#### 1.12. SUBPRODUCTOS

Del gas proveniente de la coquización, se obtienen principalmente los siguientes subproductos:

- a) Amoniaco.
- b) Benceno.
- c) Tolueno.
- d) Xileno.
- e) Nafta aromática pesada.
- f) Naftaleno.
- g) Creosota.
- h) Brea de Alquitrán.

## C A P I T U L O   I I

### E M I S I O N E S

#### 2.1. TIPOS DE CONTAMINANTES EMITIDOS EN LOS PROCESOS DE FUNDICION

**EMISION DURANTE LAS OPERACIONES DE MANIPULACION DE HULLA-Y COQUE.** Las emisiones fundamentales durante el manejo de la hulla y el coque, son polvos de carbón y hulla respectivamente. El tamaño de las partículas emitidas a la atmósfera, son por término medio bastante inferiores a 0.1 mm quedando en suspensión las fracciones entre una y diez micras. Estas partículas se suelen producir en los puntos de transbordo por caída libre o en las operaciones de molienda y cribado.

También se producen emisiones secundarias, que pueden estar formadas por partículas de óxidos (por oxidación de las estructuras) y caucho; aunque en general en pequeña cuantía.

#### EMISIONES EN INSTALACIONES DE SINTERIZACION.

##### a) PARTICULAS

Las emisiones de partículas, procedentes de las cajas de aspiración, han sido objeto de considerable investigación en la industria siderúrgica, ya que las emisiones incontroladas, representan una fuente potencial importante de contaminación atmosférica.

Las concentraciones de polvos que llegan a los colectores varían aproximadamente entre  $4.6 \text{ g/Nm}^3$  y  $9.2 \text{ g/Nm}^3$ . A la salida de los colectores a la chimenea, la concentración de polvos oscila entre  $0.46$  y  $1.6 \text{ g/Nm}^3$ . Como ejemplo, una cinta de 6000 toneladas por día de capacidad con una concentración de partículas en chimenea de  $0.46 \text{ g/Nm}^3$ , emitirá cerca de 20,000 toneladas por año de partículas o sea 10 Kg. por tonelada de sinter producido.

La distribución de tamaños del polvo emitido es el siguiente:

<u>M (micras)</u>	<u>% (porciento)</u>
76	36.9
76 - 178	36.8
178 - 420	22.6
420	3.7

En cuanto al extremo de descarga de la cinta, los datos indican valores que pueden superar a las 100 toneladas por día. La distribución de tamaños de polvo en esta sección de las instalaciones de sinterización es el siguiente:

<u>M (micras)</u>	<u>% (porciento)</u>
10	10
10 - 100	40
100	50

De aquí podemos deducir, que hay que contar con un factor de emisión de 11 Kg. de partículas por tonelada de sinter producido.

En resumen, la emisión total de una instalación de sinterización dotada de un equipo normal de limpieza de gases puede establecerse entre 5 y 50 Kg. por tonelada de sinter producido; usando equipo adecuado de control, esta emisión se reduce a unos 2Kg.

**b) OXIDOS DE AZUFRE ( $SO_2$  y  $SO_3$ )**

Las fuentes potenciales de emisiones de óxidos de azufre son las materias primas y el combustible utilizados. Se calcula que entran en el proceso de sinterización cerca de 1 Kg. de azufre por tonelada de sinter producido; del cual un 36% sale del sistema en los gases, el factor de emisión en las cajas de aspiración es de 0.4 Kg. por tonelada de sinter.

**c) MONOXIDO DE CARBONO (CO)**

De acuerdo con los datos experimentales, los contenidos -

de CO en los gases de las cajas de aspiración ascienden a unos 17 m<sup>3</sup> por tonelada de sinter, o sea unos 20 Kg. de CO por tonelada de sinter (13 mg/Nm<sup>3</sup>)

d) OXIDOS DE NITROGENO (NO<sub>x</sub>)

Los datos disponibles son de 0.5 Kg. de NO<sub>x</sub> por tonelada de sinter (cajas de viento) (80 mg/Nm<sup>3</sup>)

e) FLUORUROS Y CLORUROS (F<sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup>)

Las concentraciones de fluoruros son muy variables, desde 0.3 partes por millón (ppm) a 150 ppm, según las materias primas y el proceso en las cajas de aspiración; de cloruros tenemos 1,600 ppm, en las aguas de lavado del venturi limpiador de gases de las cajas.

**EMISIONES EN LAS INSTALACIONES DE PELETIZACION.** Los únicos datos disponibles en cuanto a emisiones, se refieren a contaminación por partículas. La molienda de caliza y la adición de bentonita son las principales fuentes de contaminación por polvos.

En una instalación sin equipo de control la emisión procedente de las operaciones citadas puede alcanzar valores de 400 g/Nm<sup>3</sup>, que se reducen al usar equipo adecuado, a unos 400 mg/Nm<sup>3</sup>.

En cuanto a la emisión procedente del tratamiento térmico de los pelets verdes para su endurecimiento, los valores de emisión son más reducidos alcanzando cifras de unos 140 g/Nm<sup>3</sup>, sin equipo de control, que se reducen a 200 mg/Nm<sup>3</sup> a la salida de los captadores de polvo.

**EMISIONES PROCEDENTES DE LAS COQUERIAS.**

a) PARTICULAS

Existen pocos datos de las emisiones de los hornos de coque, y es muy posible que difieran grandemente de un país a o-

tro, la gama disponible de pérdidas de polvo oscila entre 41 y 1,250 gramos por tonelada de hulla, dependiendo del tipo de hulla y del manejo de los hornos.

En cuanto al proceso de extracción del coque de los hornos, da lugar a dos tipos de emisión: se produce polvo por arrastre térmico de las partículas de coque abrasionado, si la coquización es completa; si es incompleta, el coque crudo humea al contacto con el aire y el humo puede dar llama.

En cuanto al apagado del coque, se tienen unos 3 Kg. de polvo por cada operación de apagado. Los datos están basados en mediciones hechas en cargas de 13 toneladas de coque apagado con unos 1,500 litros de agua en dos minutos.

La distribución correspondiente al conjunto de operaciones de coquizado es la siguiente:

$\mu$ (micras)	% (porcentaje)
250	21.7
250 - 74	34.2
74	<u>44.1</u>
	100.0

**b) OXIDOS DE AZUFRE ( $SO_2$  y  $SO_3$ )**

La producción de una tonelada de coque requiere unos 1400 Kg. de hulla. El balanceo de azufre en la coquización se da en el siguiente cuadro:

ENTRADAS	CANTIDAD (Kg)	AZUFRE (%)	AZUFRE (Kg)
Hulla	1,400	0.8	11.2
<b>SALIDAS</b>			
Coque	1,000	0.7	7.0
Subproductos	120	0.34	0.5
Gas	250	1.45	3.7
<b>TOTAL</b>			<b>11.2</b>

**e) MONOXIDO DE CARBONO (CO)**

Como en el caso de los óxidos de azufre, todo el CO producido en la coquización va en el gas de baterías que al quemarse como combustible no hay emisión de CO, salvo fallos accidentales.

**d) ACIDO SULFHDIRICO (H<sub>2</sub>S)**

De todos los compuestos de azufre, el sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico, es el único que presenta importancia en la industria siderúrgica; pero no es factor de emisión durante la producción y el apagado del coque.

**EMISIONES PROCEDENTES DEL ALTO HORNO.**

**a) PARTICULAS**

El contenido de polvo de gases de escape sin equipo de limpieza (caso teórico), es de 16 a 30 g/Nm<sup>3</sup>.

Según el equipo de limpieza disponible estos valores se reducen, de acuerdo a las etapas de lavado:

Después de los ciclones -----	7.0 - 14	g/Nm <sup>3</sup>
Después de lavadores -----	0.7	g/Nm <sup>3</sup>
Después de Venturis -----	10.0 - 20	g/Nm <sup>3</sup>

**b) OXIDOS DE AZUFRE (SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>)**

La concentración de azufre en la escoria y el lavado húmedo de los gases de alto horno hacen que su valor como emisor potencial de óxidos de azufre sea nulo. No así el tratamiento posterior de la escoria de alto horno que representa un mayor potencial de emisión de óxidos de azufre.

**c) MONOXIDO DE CARBONO (CO)**

Los gases de alto horno que contienen del 20 al 30% de CO se usan fundamentalmente como combustibles y su combustión es completa, las posibilidades de emisión de CO por la combustión de gas de alto horno son muy restringidas, salvo fallos accidentales en las conducciones.

**EMISIONES EN LOS HORNOS ELECTRICOS DE FERROALEACIONES.** La fabricación de ferroaleaciones tiene diversas fases en la que se producen emisiones de polvos y humos. El problema más importantes lo presentan, con mucho, los propios hornos de ferroaleaciones, más que las operaciones de transporte, molienda y cribado de la ferroaleación.

Los hornos normales de arco sumergido usan la reducción por carbono de óxidos metálicos, produciendo grandes cantidades de CO.

En los hornos abiertos, prácticamente todo el CO se quema a CO<sub>2</sub> en la parte superior de la carga; sin embargo, las emisiones de partículas pueden ser bastante grandes.

En los hornos semicerrados, la mayor parte del CO es extraído del mismo y se le quema con aire secundario introducido en el sistema.

#### **EMISIONES PROCEDENTES DE CONVERTIDORES.**

##### **a) PARTICULAS**

Los índices de emisión de los gases de la boca del convertidor equivalen aproximadamente de 11 a 18 g/Nm<sup>3</sup> antes de su limpieza o también de 10 a 30 Kg. por tonelada de acero.

Durante el llenado de los convertidores con arrabio líquido se producen cantidades altas de partículas de grafito y óxidos que se evacúan mediante una campana de ventilación.

Después de las operaciones de lavado de los gases, el contenido de polvos baja a unos 100 mg/Nm<sup>3</sup> o sea unos 200 gramos por tonelada de acero.

##### **b) MONOXIDO DE CARBONO (CO)**

Teóricamente el convertidor produce unos 60 Kg por tonelada de acero; sin embargo, como este CO se quema en los gases de salida, su porcentaje en estos gases se reduce a menos de 0.3% del volumen total de gases de combustión.

##### **c) FLUORUROS Y CLORUROS (F<sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup>)**

Se utilizan en el proceso y como fundentes en cantidades del orden de 5 Kg. por tonelada de acero. La emisión potencial de fluoruros sería de unos 80 gramos por tonelada de acero aunque la mayor parte se queda en la escoria. A base de los actuales sistemas de limpieza de gas, las emisiones pueden oscilar entre 0.9 gramos por tonelada de acero para sistemas húmedos y 13 gramos por tonelada para sistemas secos.

### EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS HORNOS ELECTRICOS.

#### a) PARTICULAS

Esta emisión alcanza valores medio diferentes, según el horno posea o no inyección de oxígeno; con inyección de oxígeno, 12 Kg por tonelada de acero; sin inyección de oxígeno, 4 Kg. por tonelada de acero. Estos datos son refiriéndose a emisiones antes de tratar los gases en un sistema de limpieza, en cuya salida los valores se reducen a cifras de 0.05 a 0.4 Kg. por tonelada de acero.

El tamaño de las partículas es de un 30% para las menores de 10 micras y, un 40% para partículas menores de 3 micras, sin y con inyección de oxígeno respectivamente.

#### b) MONOXIDO DE CARBONO (CO)

Las emisiones de CO en un horno eléctrico se estiman como muy reducidas. En todo caso la máxima emisión de CO tiene lugar durante el soplado con oxígeno, alcanzado durante un corto período de tiempo hasta el 60 % del volumen de gases emitidos. Como la mayoría del CO producido se quema a la salida del horno, la contaminación causada es de poca cuantía.

#### c) FLUORUROS Y CLORUROS ( $F^-$ y $Cl^-$ )

El consumo medio del espato flúor en el horno eléctrico, es del orden de 3.4 Kg. por tonelada de acero, para aceros al carbono. Los valores del factor de emisión de fluoruros son 0.1 Kg. por tonelada y 0.3 Kg. por tonelada, para aceros alca-

dos que se reducen por los sistemas de limpieza a 2 gramos por tonelada y 4 gramos por tonelada respectivamente.

## EMISIONES DE LOS HORNOS SIEMENS

### a) PARTICULAS

Los valores antes de limpiar los gases, oscilan para los procesos sin inyección de oxígeno de 0.3 a 1.5 g/Nm<sup>3</sup> (1 a 10 Kg. por tonelada de acero). El 85% de éstas partículas son óxidos de hierro con un diámetro medio de una micra y el 15% restante son partículas esféricas de óxido magnético de hierro de 3 a 5 micras.

### b) OXIDOS DE AZUFRE (SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>)

El horno Siemens usa cantidades importantes de combustibles líquidos y gaseosos. Aproximadamente la mitad de azufre que entra en el horno es evacuado en forma de SO<sub>2</sub> por la chimenea.

Si se adopta como carga típica 60% de arrabio líquido y 40% de chatarra, con inyección de oxígeno y usando combustóleo como combustible con 0.55% de azufre la cantidad de azufre en los gases de salida es del orden de 300 gramos por tonelada de acero. El balance de azufre en el horno depende del que contenga el combustible.

### c) OXIDOS DE NITROGENO (NO<sub>x</sub>)

Las condiciones del proceso favorecen la producción de NO<sub>x</sub>. El análisis durante la inyección de oxígeno da valores de 510 a 676 mg/Nm<sup>3</sup> de óxidos de Nitrógeno. El factor de emisión puede cifrarse en 1.1 Kg. por tonelada de acero.

### d) FLUORUROS (F<sup>-</sup>)

El consumo de espato flúor en el horno Siemens es de 2 Kg por tonelada de acero. El factor de emisión varía de 0.9 gramos por tonelada para un colector húmedo y 1.3 gramos por tonelada para un colector seco.

**EMISIONES DURANTE LA LAMINACION EN FRIO.** Las operaciones de laminación en frío no son en sí emisiones contaminantes; lo que sí contribuye a la contaminación son las operaciones previas de decapado ácido y galvanizado.

**a) DECAPADO ACIDO**

Generalmente para aceros al carbono se usan ácidos clorhídrico y sulfúrico. Durante el decapado se producen emisiones de vapores ácidos, cuando se trata de ácido clorhídrico, sulfúrico y fluorhídrico. Las cantidades de éstos ácidos en los vapores están bien determinadas, sólo con el ácido nítrico se complica el problema, ya que se descompone fácilmente, dando lugar a  $\text{NO}_x$ , vapores nítricos y nitrosos.

**b) GALVANOPLASTIA**

El calentamiento del acero origina gases procedentes de la combustión del gas natural. En las operaciones de galvanoplastia se producen nieblas ácidas gaseosas, productos de la reacción de electrólisis.

**EMISIONES PROCEDENTES DE TRATAMIENTOS TERMICOS.** Estos procesos se consideran poco emisores de contaminantes pero pueden producirse algunas emisiones, siendo su origen el siguiente:

- a) Humos y productos de la combustión incompleta por mala regulación de la combustión de gas o combustóleo.
- b) Vapores y humos procedentes de la volatilización de material orgánico de las piezas sometidas al tratamiento.
- c) Nieblas de aceites y humos que emanan de los baños de temple (si se usan aceites solubles en agua, los humos son una mezcla de niebla acuosa y aceite).
- d) Humos salinos emitidos por los baños de sales.

Los factores de emisión, sin embargo, no están cuantificados.

A continuación hacemos un resumen de los distintos proce-

tos siderúrgicos, analizados en el presente punto, con indicación de la emisión que producen:

1. RECEPCION, ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION DE MATERIAS PRIMAS  
- Partículas

2. INSTALACIONES DE AGLOMERACION (SINTERIZACION Y PELETIZACION)

- Partículas
- Anhídrido sulfuroso ( $SO_2$ )
- Monóxido de carbono (CO)
- Oxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )
- Fluoruros ( $F^-$ )

3. COQUERIAS E INSTALACIONES DE RECUPERACION DE SUBPRODUCTOS

- Manutención: Partículas
- Preparación de la pasta: Partículas
- Baterías: Partículas,  $H_2S$ , CO, olores
- Subproductos: Emanaciones diversas

4. ALTO HORNO

- Partículas
- Anhídrido sulfuroso ( $SO_2$ )
- Monóxido de carbono (CO)

5. HORNOS DE FERROALEACIONES (CONVERTIDORES)

- Partículas

6. FABRICACION DE ACERO

- Convertidores L.D.: Humos rojos
- Siemens-Martin: Polvos,  $SO_2$ , ácido fluorhídrico, humos-rojos si se inyecta oxígeno

7. LAMINACION EN CALIENTE Y EN FRIO

- Hornos de recalentamiento: Humos, anhídrido sulfuroso
- Decapado: Vapores ácidos, ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )
- Galvanizado: Vapores de zinc

3. TRATAMIENTOS TERMICOS

- Vapores y humos

2.2. EFECTOS QUE PRODUCEN LOS CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA

Se han establecido abundantes pruebas de que la contaminación del aire daña a la vegetación, acelera el deterioro de los materiales, perjudica a las construcciones, afecta al clima, disminuye la visibilidad y la radiación solar, agrava las relaciones públicas, hace aumentar los costos de producción, contribuye a provocar riesgos, interfiere en la calidad de la vida y de la propiedad, y es un factor evidente de la morbilidad y mortalidad humana y animal.

IMPLICACIONES SOCIOECONOMICAS

Es muy posible que nuestros sistemas económicos hayan contribuido a que se prolongue la contaminación del aire. Debido a la naturaleza de los problemas ambientales, las motivaciones para su control generalmente son externas a las presiones del mercado.

Baste decir que el problema de la contaminación atmosférica es complicado a causa de los muchos factores sociales; que se requiere la intervención pública en el proceso de decidir y que será imprescindible en todas las oficinas gubernamentales, instituciones públicas y recursos y talento privado trabajen en colaboración para encontrar y ejecutar las soluciones óptimas. Tanto el sector público como el privado pueden obtener beneficios como los siguientes:

a) BENEFICIOS PUBLICOS

1. Mejor nivel de salud.
2. Reducción de peligros de la seguridad.
3. Reducción de los peligros para la salud del hombre.
4. Daños menores a la propiedad.
5. Aumento del valor de las propiedades.
6. Menores perjuicios a la vegetación.

**b) BENEFICIOS PARTICULARES**

1. Menos riesgos de demandas por daños civiles.
2. Menores costos de mantenimiento.
3. Aumento del valor de las propiedades.
4. Recuperación de productos antes rechazados.
5. Nuevos mercados para productos nuevos relacionados con el control de la contaminación del aire.
6. Menor contaminación y daño en el producto.

**EFFECTOS EN LOS MATERIALES**

Todo lo que se necesita es caminar por una de nuestras zonas urbanas e industrializadas para ver la suciedad ocasionada por la contaminación del aire. Los edificios cubiertos de hollín, las ventanas y parabrisas sucios, las superficies metálicas corroídas, etc.

Es difícil asignar un valor económico a las obras de arte dañadas o el valor estético de un ambiente limpio. Los daños producidos por la erosión y la corrosión están relacionados en forma significativa con la presencia de otros contaminantes y condiciones climáticas. Las partículas pueden producir la corrosión por acción galvánica. Si además va unido al mismo efecto producido por los materiales de partículas ácidas o alcalinas y por la humedad, las tasas de corrosión se aceleran más. Los efectos de ensuciamiento y corrosión no sólo hacen subir mucho los costos de mantenimiento de la propiedad sino que devalúan las propiedades.

**a) OXIDOS DE AZUFRE**

Puesto que los compuestos de azufre en solución son muy activos químicamente tanto como agentes oxidantes como reductores, no es sorprendente que muchas formas de perjuicios materiales se puedan achacar a las concentraciones atmosféricas de compuestos de azufre. Los materiales de construcción inclusive los de albañilería, se han ido destruyendo lentamente. Los ma

teriales textiles en algunos casos no sólo se han desteñido o debilitado sino disuelto. Objetos de arte valioso, papeles y libros se han deteriorado. Aunque es cierto que un curso de química elemental puede demostrar los daños potenciales de la presencia de compuestos de azufre en el aire, es más importante observar que tales perjuicios se están llevando a cabo. Conocemos los mecanismos implicados, pero sólo podemos calcular los costos de los daños totales. Los estudios aislados han demostrado que dichos costos pueden alcanzar cifras astronómicas en nuestras zonas urbanas.

#### b) OXIDANTES FOTOQUÍMICOS

El smog fotoquímico contiene -según se ha demostrado- una mezcla bastante compleja y variada de agentes oxidantes y reductores.

Existen una gran diversidad de oxidantes tales como el ozono y el  $\text{NO}_x$  los cuales tienen efectos nocivos en las telas teñidas, fibras textiles y sintéticas y otros materiales orgánicos.

#### EFFECTOS EN LA SALUD HUMANA

Aunque haya concentraciones de contaminantes del aire que sean aceptables para el público a cambio de otros beneficios - (si se acepta que haya beneficios significativos soportando la contaminación del aire), muchos grupos importantes de ciudadanos han demostrado que no están dispuestos a exponer la salud humana, la mayoría de los grupos públicos interesados están muy conscientes de los efectos tóxicos agudos derivados de evidencias obtenidas durante condiciones meteorológicas adversas en todo el mundo. Graves desastres han ocurrido en diferentes lugares para que se fije muy detenidamente la atención en este punto.

#### EFFECTOS AGUDOS

Los episodios desastrosos provocados por la contaminación atmosférica, han demostrado que las concentraciones elevadas de contaminantes han ocasionado la muerte prematura a miles de personas. Los meteorologistas han comprobado que el clima desfavorable que contribuyó a tales desastres puede presentarse con cierta frecuencia.

### EFFECTOS CRONICOS

Aunque los efectos agudos de la contaminación del aire son alarmantes, los efectos crónicos son más dignos de preocupación. Los estudios epidemiológicos y clínicos han asociado los diversos contaminantes del aire a todos los padecimientos desde el catarro común hasta el cáncer. Repetidamente en investigaciones de este tipo, se han establecido relaciones entre las enfermedades respiratorias y la contaminación. Muchos de los estudios podrían presentarse a dudas. La susceptibilidad humana a los contaminantes del aire varía mucho. El número de contaminantes y las concentraciones combinadas de cada uno de ellos son prácticamente infinitas. No se pueden hacer pruebas clínicas exponiendo a receptores humanos a todas las mezclas de contaminantes a diferentes concentraciones. En las investigaciones epidemiológicas resultaba y todavía es bastante impracticable medir todos los contaminantes presentes durante el período completo de exposición. Por lo tanto, quizá lo mejor que se puede hacer es determinar las correlaciones posibles entre las exposiciones crónicas a la contaminación del aire y los efectos que tienen en la salud.

### PELIGRO DE ACCIDENTES

Las concentraciones y períodos de exposición del monóxido de carbono, se han comparado con las concentraciones carboxihemoglobina en la sangre y éstas, a su vez, se han relacionado con deterioro del discernimiento y de la coordinación humanos.

### EFFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AIRE EN ANIMALES

Aunque no existen pruebas tan abundantes ni tan bien documentadas como en el caso del hombre, es evidente que muchos de los casos de contaminación aguda del aire que han resultado de desastrosos para los seres humanos, han tenido efectos todavía peores en los animales domésticos.

Además de estar sometidos a los perjuicios de la inhala - ción del aire contaminado, los animales pueden caer enfermos + por comer alimentos contaminados por el aire. Aunque la conce - tración en el aire de un determinado contaminante sea demasia - do baja para ocasionar daños por inhalación, la acumulación y concentración de contaminantes en el aire, en la vegetación y en el forraje pueden producir una intoxicación posterior a la ingestión de los alimentos contaminados.

### DAÑOS OCASIONADOS A LA VEGETACION POR LOS CONTAMINANTES - DEL AIRE

Los perjuicios causados por la contaminación del aire a las plantas se ha venido observando desde hace por lo menos un siglo. Sin embargo, estos conocimientos a menudo se pasaban - por lo alto o se difundían poco.

La completa defoliación de la vegetación asociada a la historia temprana de la contaminación con bióxido de azufre, - anhídrido sulfuroso procedente de las fundidoras, ya no es un problema de primordial importancia. Sin embargo, se han desa - rrollado otras fuentes de emisión de anhídrido sulfuroso y se están extendiendo cada vez más.

Las partículas también han producido fitotoxicidad, gene - ralmente al cubrir las hojas de la planta inhibiendo así posi - blemente su respiración por los estomas y/o reduciendo la foto - síntesis por absorción de la luz.

Los contaminantes gaseosos entran en el aire por los esto - mas durante el ciclo normal de respiración de la planta. Los -

contaminantes destruyen la clorofila, alteran el proceso fotosintético y, en consecuencia, disminuyen la producción de alimentos.

#### EFFECTOS DE LA CONTAMINACION GLOBAL DEL AIRE

El factor que influye principalmente en el clima mundial es el equilibrio del calor de la tierra. Las cantidades de calor recibido, retenido y reflejado por la tierra y su atmósfera determinan el estado de este delicado equilibrio ecológico. Los fenómenos climatológicos como el viento, las tormentas, las nubes, la lluvia y la nieve y los cambios de energía asociados a ellos dependen en gran parte de este equilibrio de calor. El hombre influye en él al añadir bióxido de carbono ( $CO_2$ ) y aerosoles a la atmósfera.

#### EFFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AIRE EN LOS CLIMAS URBANOS

El clima urbano sufre la influencia de muchos factores que no afectan al campo que rodea a las ciudades. Entre estos factores que influyen en el clima urbano diferenciándolo de sus alrededores, están:

1. La diferencia entre los materiales superficiales.
2. Una variedad mucho mayor de formas y orientaciones de las estructuras de la ciudad que la de los paisajes naturales de las zonas rurales.
3. La enorme producción de calor, especialmente en invierno, cuando funciona la calefacción.
4. La rápida eliminación de la precipitación pluvial del medio urbano.
5. La pesada carga de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos que contiene el aire en las ciudades.

#### EFFECTOS EN LA NEBLA

Las nieblas más duraderas de las zonas urbanas están relacionadas con la superabundancia de núcleos de condensación, - que producen una niebla de gotitas de menor tamaño. La composición química de los núcleos de condensación y las gotas también pueden tener un papel importante.

Las nieblas más prolongadas disminuyen la entrada del sol dificultan el transporte e inhiben la ventilación atmosférica de una región.

#### EFFECTOS EN LA PRECIPITACION

Los factores urbanos que tienden a aumentar la precipitación pluvial son:

1. Adición de vapor de agua procedente de las combustiones y de las fábricas.
2. Corrientes térmicas de tiro ascendente procedentes de calentamiento local.
3. Corrientes de tiro ascendentes procedentes de un aumento de la turbulencia por fricción.
4. Mayor número de núcleos de condensación que hacen que se formen más nubes.
5. Núcleos de condensación adicionales que posiblemente actúen como centros de congelamiento para las partículas de niebla poco enfriadas.

Se descubrió que el humo de los hornos de acero era una fuente prolífica de núcleos de congelación y que aumentaba la cifra con un factor de 50 en comparación con el aire limpio cercano.

En resumen, se puede decir que aunque el total de la evidencia disponible no es concluyente, parece que los patrones de la precipitación pluvial en las ciudades indica que hay pequeños aumentos de precipitación en las localidades que se encuentran en las rutas de los vientos procedentes de las ciudades y que la siembra de las nubes con el aerosol de los conta-

minantes es por lo menos una parte de la causa de este aumento.

#### EFFECTOS EN LA PENETRACION DE LA RADIACION SOLAR

La capa de materia en partículas que cubre la mayoría de las grandes ciudades hace que la energía solar que llega al complejo urbano sea significativamente menor que la que se observa en las zonas rurales. Las partículas son más eficaces como atenuantes de la radiación cuando el ángulo del sol es bajo puesto que la longitud del trayecto que tiene que pasar las radiaciones a través de las partículas depende de la elevación del sol. Así, para una cantidad dada de materia en partículas, la radiación solar disminuirá al máximo en las ciudades de una latitud alta y durante el invierno.

#### VISIBILIDAD

La disminución de la visibilidad es probablemente uno de los efectos más comunes de la contaminación del aire que percibe el individuo común. Por lo tanto, es algo de lo que se quejará y, a su vez, culpará a las emisiones que pueda ver.

La visibilidad disminuida crea una carga económica en muchas colectividades. El transporte y el bienestar general se perjudican. La reducida visibilidad retrasa la frecuencia de aterrizajes y salidas de los aviones en los aeropuertos. Los individuos se ven obligados a aceptar peligros que pueden terminar en muerte, daños personales y/o daño a la propiedad. El tránsito automovilístico se vuelve más lento debido a las deficiencias en la visibilidad atmosférica. Si la visión del conductor disminuye, aumentan los accidentes y, por lo tanto, las heridas, muertes y daños a la propiedad. También los barcos en las bahías tienen dificultades semejantes.

Una menor visibilidad obliga a aumentar los medios de transporte para cubrir las demandas normales de tránsito. El dinero necesario para estas construcciones saldrá, en último -

término, de los ciudadanos, así como el costo más elevado de las pólizas de seguro, consecuencia de un mayor número de accidentes.

Quizá haya incluso que aumentar el uso de la electricidad para compensar la falta de luz natural y un ambiente sucio no es conveniente para producir una sensación de bienestar al hombre.

### 2.3. FACTORES DE EMISION DE CONTAMINANTES EN LOS PROCESOS DE FUNDICION

Los procesos de fabricación del hierro y del acero pueden agruparse en cinco operaciones secuenciales:

1. Producción de coque.
2. Fabricación de arrabio en altos hornos.
3. Fabricación de hierro en base a inyección de oxígeno, arco eléctrico y hornos de hogar abierto.
4. Operaciones de rolado.
5. Operaciones finales.

#### FABRICACION DE ARRABIO

El arrabio se produce en altos hornos, los cuales están hechos de cámaras refractarias dentro de las que el mineral de hierro y el coque es cargado y reaccionan con grandes cantidades de aire caliente para producir hierro moldeado. La escoria y el gas del horno son subproductos de esta operación. La producción de un peso unitario de arrabio, requiere una carga promedio de 1.55 pesos unitarios de cargas de hierro, 0.55 pesos unitarios de coque y 2.3 unidades de peso de aire. Los subproductos del alto horno consisten en 0.2 unidades de peso de escoria, 0.02 unidades de peso de polvos y 2.5 unidades de peso de gas por unidad de arrabio producido.

La combustión de gas de alto horno y los gases de escape-

constituye la mayor fuente de emisión de partículas. El polvo en el gas consiste de 35 a 50% de hierro, 4 a 14% de carbón, 8 a 13% de bióxidos de silicio y pequeñas cantidades de óxido de aluminio, óxido de manganeso, óxido de calcio. Debido a su alto contenido de monóxido de carbono, este gas tiene un bajo valor calorífico (aprox. 100 Btu/ft) y se usa como combustible dentro de la planta; pero antes de usarlo se hace necesario limpiarlo con algún equipo de control.

#### FABRICACION DE ACERO

##### a) HORNOS DE HOGAR ABIERTO

En este proceso, una mezcla de fracciones de hierro, acero y arrabio es fundido en una vasija u hogar en la que varios combustibles, gaseosos o líquidos proveen el calor, las emisiones consisten de partículas y pequeñas cantidades de fluoruros. Las partículas se componen primeramente de óxidos de hierro en un 45 a 50%, en el rango micrométrico de 0 a 5. La cantidad de polvo en los gases de salida se incrementan bastante al usar lanza de oxígeno. Los equipos más usados para controlar éstas partículas son precipitadores electrostáticos y Venturi-scrubbers de alta energía.

##### b) HORNOS A BASE DE OXIGENO

Este proceso también llamado proceso "Linz-Donawitz" (LD) es usado para producir acero de una composición aproximadamente de 70% de metal fundido de alto horno y 30% de partículas de metal por el uso de oxígeno puro comercial para oxidar las impurezas, principalmente el carbón y el sílice.

La reacción que convierte el hierro fundido en acero genera bastantes partículas, sobre todo en forma de óxidos de hierro. La carga de polvos varía de 11 a 8  $g/m^3$  estándar y un gran porcentaje de partículas están entre 0 y 5 micras.

Además, grandes cantidades de monóxido de carbono (63.5 - Kg/ton de acero y más) es generado por la reacción, la combus-

ción en el crisol, deslumbre directo o algunos otros medios de ignición. Se usan en la pila para reducir las emisiones actuales de monóxido de carbono a menos de 1.5 Kg/TM. El equipo de control para estas partículas son Venturi-scrubbers, precipitadores electrostáticos; ambos tienen eficiencias del 99%.

#### c) HORNOS DE ARCO ELECTRICO

Los hornos eléctricos, se usan primero para producir aleaciones especiales de acero.

En los últimos años se ha usado el oxígeno para incrementar la uniformidad de la fundición y para decrementar la potencia consumida. Las partículas primeramente óxidos de hierro, manganeso, aluminio y silicio, que se desarrollan cuando el acero es procesado en un horno eléctrico resultan de la exposición de acero fundido a temperaturas extremadamente altas, la cantidad de estas emisiones es función de la composición de los fragmentos de las cargas de metal, el proceso de refinado-usado (con o sin lanza de oxígeno) y el tiempo de refinado. En cuanto a micrometría 40 a 75% de las partículas están en el rango de 0 a 5. También se emiten cantidades moderadas de monóxido de carbono (6.8 a 9 Kg/ton).

El equipo para el control de partículas en hornos eléctricos más usados son Venturi-scrubbers con una eficiencia del 98% y filtros de bolsas con 99%.

#### d) PULIDO

Es un método de preparación de la superficie del acero se interminado. Una máquina de pulido, remueve los defectos de la superficie de los lingotes antes de que sean trabajados, por aplicación de chorros de oxígeno a la superficie, la cual está al rojo, removiendo así una capa delgada del metal por oxidación rápida.

Las emisiones en esta operación consisten en fumos de óxido de hierro. Las técnicas de control para la remoción de partículas finas es variable, pero una de las más comúnmente usa-

das es la del precipitador electrostático, que tiene aproximadamente 94% de eficiencia.

A continuación se detallan y amplían en una forma más completa en la Tabla 2.3.1, los diferentes factores de emisión para las fundiciones del hierro y el acero, por tipo de operación.

Tabla 2.3.1. Factores de emisión para la industria del hierro y el acero

Tipo de operación	Total de Partículas Kg/Ton M	Monóxido de Carbono Kg/Ton M	Fluoruros	
			Gases(HF) Kg/Ton M	Partículas (CaF <sub>2</sub> ) Kg/Ton M
Producción de a - rratio en alto - orno				
Carga de mineral - no controlado	55	875 700-1050	-	-
Cargas de aglome - rados no controla - dos	20	-	-	-
Total, no contro - lado	75	875	-	-
	65-100	700-1050		
Cámara de Sedimen - tación o ciclón - seco	30	-	-	-
Gas Scrubber húme - do	75	-	-	-
Gas Venturi o Pre - cipitador Elec - trostático	.75	-	-	-
Sinterización Caja de viento, - sin controlar	10	-	-	-
Ciclón seco	1	-	-	-

Tabla 2.3.1. (continuación)

Tipo de operación	Total de Partículas	Monóxido de Carbono	Fluoruros	
			Gases (HF)	Partículas (CaF <sub>2</sub> )
	Kg/Ton M	Kg/Ton M	Kg/Ton M	Kg/Ton M
Ciclón seco más - Precipitador Electrostático	0.5	-	-	-
Ciclón seco más - Scrubber	0.02	-	-	-
Descarga sin controlar	11	22	-	-
Ciclón seco	1.1	22	-	-
Ciclón seco más - Precipitador electrostático	0.055	22	-	-
Producción de acero				
Horno de hogar abierto sin lanzas de oxígeno, no controlado	4.15 2.9-6	-	0.05	0.015
Lavador Venturi	0.085	-	0.0055	0.0008
Precipitador Electrostático	0.085	-	0.05	0.0003
Con lanza de oxígeno, no controlado	8.7	-	0.05	0.015
Lavador Venturi	0.085	-	0.0055	0.0008
Precipitador Electrostático	0.175	-	0.05	0.0003
Oxígeno básico, no controlado	25.5	69.5	neg	0.100
	16-43	52-118.5		
Venturi Scrubber	0.255	-	-	0.001
Precipitador Electrostático	0.255	-	-	0.001
Cámara de rocío	4.65	-	-	0.030

Tabla 2.3.1. (continuación)

Tipo de operación	Total de Partículas	Monóxido de Carbono	Fluoruros	
			Gases (HF)	Partículas (CaF <sub>2</sub> )
	Kg/Ton M	Kg/Ton M	Kg/Ton M	Kg/Ton M
Arco Eléctrico Sin lanza de oxígeno, no controlado	4.6	9	0.006	0.119
	3.5-5.3	9	0.0009	0.0055
Lavador Venturi	0.09	9	0.0009	0.0055
Precipitador Electrostático	.14-.37	9	0.006	0.0055
Casa de Bolsas	0.045	9	0.006	0.0012
Con lanza de oxígeno, sin controlar	5.5	9	0.006	0.119
Lavador Venturi	0.11	9	0.0009	0.0055
Precipitador Electrostático	.165-.44	9	0.006	0.0055
Casa de Bolsas	0.055	9	0.006	0.0012
Pulido, no controlado	Menor o igual a 0.5	-	-	-
Precipitador Electrostático	Menor o igual a 0.3	-	-	-
Lavador Venturi	Menor o igual a .01	-	-	-

En la Tabla 2.3.2. se dan factores de emisión para la manufactura de coque metalúrgico sin control. Finalmente, en la Tabla 2.3.3. se consignan los factores de emisión para fundición de acero.

#### 2.4. REGLAMENTACION EXISTENTE EN MEXICO PARA EL CONTROL DE LOS CONTAMINANTES QUE SE PRODUCEN

Actualmente es bien conocido el riesgo que la contamina -

Tabla 2.3.2. Factores de emisión para la manufactura de coque-metalúrgico sin control

Tipo de operación	Partículas	Dióxido de Sulfuro	Monóxido de Carbono	Hidrocarburos	Oxidos de Nitrógeno	Amoniaco
	Kg/TM	Kg/TM	Kg/TM	Kg/TM	Kg/TM	Kg/TM
Por producción de coque						
Descargando del vehículo	0.2	-	-	-	-	-
Cargando	0.75	0.01	0.3	1.25	0.015	0.01
Ciclo del coque	0.05	-	0.3	0.75	0.005	0.03
Descarga del horno	0.3	-	0.035	0.1	-	0.05
Apagado	0.05	-	-	-	-	-
Aire secundario inferior	-	2	-	-	-	-
Horno de colmena	100	-	0.5	4	-	1

Tabla 2.3.3. Factores de emisión para fundición de acero

Tipo de proceso	Partículas Kg/TM	Oxidos de Nitrógeno Kg/TM
Fundición		
Horno de Arco Eléctrico	6.5 (2 a 20)	0.1
Horno de Hogarabierto	5.5 (1 a 10)	0.005
Horno de Hogarabierto con lanza de oxígeno	5 (4 a 5.5)	-
Horno de Inducción Eléctrica	0.05	-

ción ambiental constituye para la salud pública y la continua-  
amenaza de degradación de los sistemas ecológicos, por lo que  
el H. Congreso de la Unión decretó en 1971, la "Ley Federal pa  
ra Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental". De dicha  
ley únicamente se han tomado aquellos artículos relacionados -  
directamente con la prevención y control de la contaminación -  
del aire. Algunos se incluyen textualmente y otros se aplican  
y mencionan, dependiendo del grado de importancia que presen -  
ten.

Artículo 7. Para establecer nuevas industrias, cuyas acti  
vidades puedan producir contaminación atmosférica por emisión  
de humos y polvos o para ampliar las existentes, se requiere -  
licencia de La Secretaría de Salubridad y Asistencia, la que -  
se otorgará, en coordinación con la Secretaría de Industria y  
Comercio si los solicitantes comprueban que se ajustan a las -  
normas de prevención y control de la contaminación atmosférica,  
así como a las demás disposiciones sanitarias.

Artículo 8. Para obtener la licencia a que se refiere el  
artículo anterior, el solicitante deberá de someter a La Secre  
taría de Salubridad y Asistencia un estudio en el que se indi  
cará:

- I. Ubicación.
- II. Materias primas, productos, subproductos y desechos.
- III. Descripción del proceso.
- IV. Distribución de maquinaria y equipo.
- V. Cantidad y naturaleza de los contaminantes esperados.
- VI. Equipos de control de la contaminación.

La Secretaría de Salubridad y Asistencia expedirá o nega  
rá la licencia correspondiente, dentro de los treinta días si  
guientes de presentada la solicitud.

Artículo 10. Las emisiones de humos, provenientes de equi  
pos estacionarios de combustión existentes, con exclusión de -

incineradores, no deberán ser más oscuras en apariencia que la señalada con el número dos en la escala conocida como Carta de Humo de Ringelmann, ni de tal opacidad que oscurezcan la visión del observador, en un grado mayor que el correspondiente al número dos de la carta mencionada; en ninguno de ambos casos las emisiones deberán exceder de períodos de más de cinco minutos en una hora.

Artículo 20. En toda operación, proceso o actividad industrial, la emisión de polvos no deberá exceder de las cantidades indicadas en la Tabla 2.4.1, en relación al peso del proceso correspondiente, o en la Tabla 2.4.2, en relación al volumen de gas en la fuente, en metros cúbicos.

Artículo 21. Las Tablas 2.4.1 y 2.4.2 empleadas para la evaluación de las emisiones de polvo a que se refiere el artículo anterior son las siguientes:

Tabla 2.4.1. Emisión máxima de polvos en relación al peso del proceso correspondiente

Peso del proceso ton/hr	Emisión máxima permitida Kg/hr	
	Industria Nueva	Industria Existente
0.025	0.489	0.652
0.050	0.780	1.040
0.100	1.239	1.652
0.220	1.974	2.632
0.300	2.589	3.452
0.400	3.141	4.188
0.500	3.648	4.464
0.750	4.788	6.348
1.000	5.805	7.740
1.250	6.741	8.988
1.500	7.617	10.156
2.000	9.237	12.316
2.500	10.725	14.300
3.000	12.120	16.160
3.500	13.437	17.916

Tabla 2.4.1. (continuación)

Peso del proceso ton/hr	Emisión máxima permitida Kg/hr	
	Industria Nueva	Industria Existente
4.000	14.694	19.592
4.500	15.900	21.200
5.000	17.064	22.752
6.000	19.281	25.708
8.000	23.382	31.176
10.000	27.153	36.204
15.000	35.625	47.500
20.000	43.200	57.600
25.000	50.166	66.888
30.000	55.572	74.096
35.000	57.462	76.616
40.000	59.127	78.836
45.000	60.564	80.752
50.000	61.926	82.568
60.000	64.269	85.693
70.000	65.556	87.408
80.000	68.052	90.736
100.000	71.154	94.872
500.000	95.436	127.248
1000.000	107.313	143.084
3000.000	130.080	172.650

Tabla 2.4.2. Concentración máxima de polvos en relación al volumen de gas en la fuente

Volumen de gas en la fuente m <sup>3</sup> normal	Concentración Industria Nueva	Concentración Industria Existente
	mg/m <sup>3</sup> normal	mg/m <sup>3</sup> normal
100	849.0	1,132.0
125	795.0	1,060.0
150	750.0	1,000.0
175	714.0	952.0
200	684.0	912.0
300	600.0	800.0
400	543.0	724.0
500	510.0	680.0
750	444.0	592.0

Tabla 2.4.2. (continuación)

Volumen de gas en la fuente m <sup>3</sup> normal	Concentración Industria Nueva mg/m <sup>3</sup> normal	Concentración Industria Existente mg/m <sup>3</sup> normal
1,000	405.0	540.0
1,500	357.0	476.0
2,000	324.0	432.0
3,000	285.0	380.0
4,000	258.0	344.0
5,000	240.0	320.0
7,500	210.0	280.0
10,000	192.0	256.0
15,000	168.0	224.0
20,000	154.2	205.6
30,000	135.0	180.0
40,000	123.0	164.0
50,000	114.0	152.0

La interpolación de los datos de la Tabla 2.4.1 para peso de proceso hasta 28.5 toneladas por hora, para industria nueva debe de hacerse usando la ecuación:  $E = 5.805 P 0.67$  y para la industria existente debe hacerse usando la ecuación :

$E = 7.74 P 0.67$ . La interpolación y extrapolación de los datos para peso de procesos mayores de 28.5 toneladas por hora para industria nueva debe llevarse a cabo usando la ecuación:

$E = 75.648 P 0.11 - 54.42$ . Para industria existente la interpolación y extrapolación de los datos para pesos de proceso mayores de 28.5 toneladas por hora debe efectuarse usando la ecuación:  $E = 100.864 P 0.11 - 72.56$ . En donde E = relación de emisión Kilogramos/hora y P = peso del proceso en toneladas/hora.

Artículo 22. Cuando la aplicación de la Tabla 2.4.1 no sea posible, se aplicará la Tabla 2.4.2.

Artículo 24. La emisión de polvos deberá referirse a condiciones normales de temperatura (25°C) y de presión (760 mm - de mercurio).

El artículo 25 se refiere a la quema de combustibles. Los

artículos 26 y 27 tratan acerca de los hornos de cubilote. Los artículos 29 y 30 se aplican a la generación de energía. Los artículos 31, 32 y 33 son referidos a establecimientos de sistemas de control, sus fallas y modificaciones.

## 2.5. REGLAMENTACION EXISTENTE EN ALGUNOS PAISES DEL MUNDO PARA EL CONTROL DE LOS CONTAMINANTES QUE SE PRODUCEN

### ESTADOS UNIDOS

Para cada clase de contaminantes, con estándares de calidad de aire, se expone la situación en particular de los Estados de Ohio y Pennsylvania, así como los límites de emisión - que según E.P.A. (Environmental Protection Agency), pueden alcanzarse con razonable tecnología. Todos los estándares de emisión que siguen se refieren a las fuentes fijas.

#### a) PARTICULAS

Ohio y Pennsylvania han establecido que las emisiones de polvos y partículas no podrán tener una opacidad mayor que el grado 1 de la Carta de Humos de Ringelmann (20% de opacidad), para polvos fugitivos la concentración media no excederá de 150 partículas/cm<sup>3</sup> sobre la concentración de fondo en más de tres muestras tomadas fuera del punto donde tiene lugar la emisión.

#### b) NORMAS INDICATIVAS DE EPA

Carga del proceso. Se define como la suma del peso de todas las materias introducidas en ese peso específico, que puede causar emisión de partículas sólidas.

Carga por hora. Se obtiene dividiendo el peso de todas las materias en las condiciones descritas que intervienen en un proceso, entre el número de horas que tarda en completarse el proceso.

EPA indica que las tasas de emisión pueden obtenerse de la Tabla 2.5.1.

Tabla 2.5.1. Tasas de emisión de la EPA

Carga del proceso	Límite de emisión
lb/hr	lb/hr
50	0.36
100	0.55
500	1.53
1,000	2.25
5,000	6.34
10,000	9.73
20,000	14.99
80,000	31.19
120,000	33.28
160,000	34.85
200,000	36.11
400,000	40.35
1,000,000	46.72

c) **OXIDOS DE AZUFRE**

Ohio ha establecido los siguientes límites de emisión para compuestos de azufre, que pueden ser de aplicación en este estudio:

- 2,000 ppm de  $SO_2$  ( $5.72 \text{ mg/Nm}^3$ ) para instalación existente
- 500 ppm de  $SO_2$  ( $1.43 \text{ mg/Nm}^3$ ) para instalación nueva
- 2.28 g de  $H_2S/\text{Nm}^3$  de gas.

d) **MONOXIDO DE CARBONO (CO)**

Los Estados no han fijado límites de emisión, sino que han prohibido las emisiones de monóxido de carbono cuando éste no ha sido quemado a  $1,300^\circ\text{F}$  ( $704^\circ\text{C}$ ) durante al menos 0.3 segundos y con llama directa.

**JAPON**

Guías de Calidad Ambiente. Las primeras fueron decretadas por el gobierno en febrero de 1969 para los óxidos de azufre y en 1970 fueron publicadas las correspondientes al monóxido de carbono y partículas en suspensión.

a) **OXIDOS DE AZUFRE ( $SO_x$ )**

1. El porcentaje del número de horas durante las cuales -

- el valor horario no es superior a 0.2 ppm, con respecto al número de horas totales del año, debe ser mantenido en un valor no inferior al 99% a lo largo del año.
2. El porcentaje del número de días durante los cuales la media diaria del valor horario no es superior a 0.05 ppm, con respecto al número de días en un año, debe ser mantenido en un valor no inferior al 70% a lo largo del año.
  3. El porcentaje del número de horas durante las cuales el valor horario no es superior a 0.1 ppm, con respecto al número total de horas en un año, debe ser mantenido en un valor no inferior al 88% a lo largo del año.
  4. La media anual de los valores horario no debe exceder de 0.05 ppm a lo largo del año.

b) MONOXIDO DE CARBONO (CO)

1. La media de los valores horarios durante cualquier período consecutivo de veinticuatro horas no debe ser superior a 10 ppm.
2. La media de los valores horarios durante cualquier período consecutivo de ocho horas no será superior a 20 ppm.

c) PARTICULAS EN SUSPENSION

La cantidad de partículas en suspensión de 10 micras o de diámetro inferior (polvo en suspensión) en un metro cúbico de aire deben ser inferiores a los límites siguientes (medidos según J.I.S. Normas Industriales Japonesas):

1. Un valor medio horario no debe exceder a 100 microgramos en cualesquiera veinticuatro horas consecutivas.
2. Cualquier valor horario debe ser 200 microgramos o inferior.

Cadmio y sus compuestos: La norma de emisión establece 1 mg/m<sup>3</sup>.

Cloro: 50 mg/m<sup>3</sup>.

Fluor: 3 a 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

Plomo y sus compuestos: 10 a 30 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### ALEMANIA

Los valores máximos de emisión admitidos por la legislación federal alemana para los distintos agentes contaminantes de la atmósfera, se encuentran recogidos en las "Instrucciones Técnicas para el Mantenimiento de la Pureza de la Atmósfera" - de septiembre de 1964.

##### a) PARTICULAS

Los datos que aparecen en el reglamento 8/9/64 se refieren a depositación de partículas en el suelo y no a partículas en suspensión.

1. Límite de depositación en zonas de alta concentración industrial:

Media anual: 0.85 g/m<sup>2</sup>- día

Media mensual: 1.3 g/m<sup>2</sup>- día.

2. Límite de la depositación en el resto de las zonas:

Media anual: 0.42 g/m<sup>2</sup>- día

Media mensual: 0.62 g/m<sup>2</sup>- día.

Para partículas en suspensión el límite es 0.48 mg/m<sup>3</sup> para partículas menores de 10 micras.

##### b) GASES

NO<sub>2</sub>: 1 mg/m<sup>3</sup> de aire

Cloro: 0.3 mg Cl/m<sup>3</sup> de aire.

H<sub>2</sub>S: 0.15 mg H<sub>2</sub>S/m<sup>3</sup> de aire.

SO<sub>2</sub>: 0.40 mg SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de aire.

CO: No está citado en el reglamento; pero existe un límite recomendado de 5 mg/m<sup>3</sup>.

## CAPITULO III

### MUESTREO

#### 3.1. METODOS DE MUESTREO DE CONTAMINANTES

El exacto y adecuado muestreo de contaminantes en el aire es muy importante por tres razones principales:

- 1) Para determinar niveles peligrosos de concentración de contaminantes en el medio ambiente.
- 2) Para determinar la eficiencia del mejoramiento de las medidas.
- 3) Para cuantificar la contaminación procedente de un proceso o de una fuente.

#### EQUIPO NECESARIO

##### a) FUENTES DE VACIO

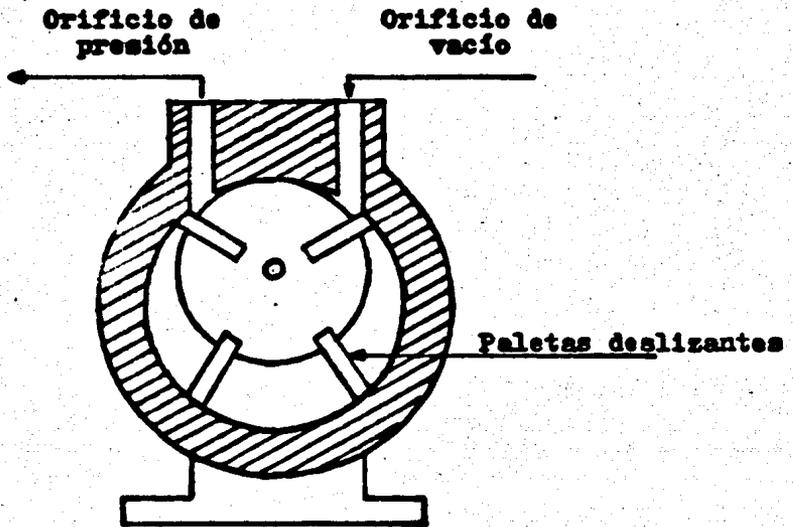
Es necesaria una bomba de vacío para aspirar un volumen conocido de aire contaminado. Las bombas de vacío más comúnmente usadas son las indicadas en la Tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1. Bombas de vacío

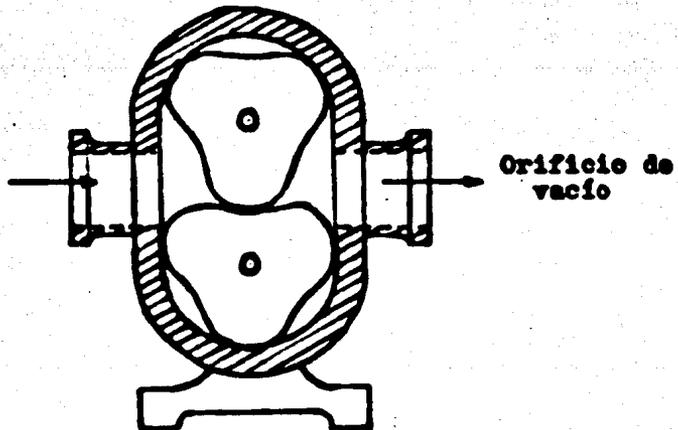
Bombas de vacío <u>mo</u> vidas con electro- motor	Bombas de vacío ope- radas a mano
Rotatorias	Aspiradoras
De lóbulos	Automóvil de vacío
Reciprocantes	
De diafragma	
Centrífugas	

En la figura 3.1.1. se muestra la sección de una bomba de vacío rotatoria. En la figura 3.1.2, se muestra la sección de una bomba de vacío de lóbulos.

La bomba de vacío debe ser seleccionada tomando en cuenta que todas las partes que estén en contacto con el aire sean fa



**Fig. 3.1.1. Bomba de vacío rotatoria (seccionada)**



**Fig. 3.1.2. Bomba de vacío de lóbulos (seccionada)**

bricadas de politetrafluoretileno o policlorotrifluoretileno.

#### b) APARATOS DE MEDICION

Hay dos tipos generales de aparatos de medición de flujo-  
usados en el muestreo de aire contaminado:

##### 1. Aparatos de medición de velocidad:

Tubo de Pitot

Orificios

Boquillas

Rotámetros

##### 2. Aparatos de medición de cantidades:

Gasómetro de prueba seca

Gasómetro de prueba húmeda

Gasómetro de lóbulos

Además, la muestra de aire contaminado debe medirse den-  
tro de la bomba, por lo que, se necesitará también de un manó-  
metro y un termómetro. Con esto el volumen propio de la mues-  
tra debe ser calculado.

### MUESTREO DE AEROSOL Y PARTICULAS CONTAMINANTES

#### a) FILTRACION

Los filtros son los dispositivos más comúnmente usados pa-  
ra la colección de muestras de aerosoles. Un filtro está cons-  
tituido de una cama de poros a través de la cual se hace pasar  
el aire, así que la fuerza de inercia o colisión directa pon-  
drá a las partículas en contacto con la superficie del filtro.

Después que la muestra se ha colectado debe hacerse un a-  
nálisis de ella, pesándola y determinando la composición quí-  
mica. Entre los diferentes filtros tenemos:

- Filtros de fibras. Se incluyen fibras de papel de made-  
ra de varios grados, papel y felpas de fibras de celulo-  
sa, lana mineral, plásticos y fibras de vidrio.
- Filtros granulares. Como ejemplos tenemos, cerámicas po-  
rosas, vidrio o metal derretido y arena; puesto que los

materiales granulares pueden obtenerse en una gran variedad de tamaños, la eficiencia de colección, también cubre un ancho rango de tamaño de partículas colectadas. En general, sin embargo, no son propios para coleccionar partículas de menos de 1 micra de diámetro.

b) SEDIMENTACION

Esta técnica sólo es conveniente para la colección de partículas grandes. La eficiencia del procedimiento depende de la sedimentación natural de las partículas de la corriente de aire. En aire quieto los dispositivos de sedimentación son totalmente satisfactorios para partículas más grandes que 5 micras.

La Tabla 3.1.2. muestra la velocidad de sedimentación para partículas esféricas en aire quieto.

Tabla 3.1.2. Velocidad de sedimentación para partículas esféricas en aire quieto

Diámetro de Partícula (micras)	Velocidad de Sedimentación (cm/seg)
100	30
10	0.3
1	0.003
0.1	0.00009

Algunos de los dispositivos de sedimentación más comunes son los siguientes:

- Precipitador electrostático. Su principio de funcionamiento es el siguiente: Se establece una alta diferencia de potencial (12,000 a 30,000 volts) entre dos electrodos y se liberan una gran cantidad de iones; al pasar las partículas a través de este espacio chocan con los iones, se cargan y son atraídas hacia el electrodo-colector donde su carga es neutralizada y la partícula-

colectada. El precipitador electrostático sólo es efectivo para coleccionar partículas que sean cargables, no remueve gases ni sólidos o líquidos volátiles abajo de la temperatura que opera y, no puede usarse en una atmósfera explosiva. El precipitador electrostático es aproximadamente 100% eficiente para partículas en el rango de 0.01 a 10 micras.

- Precipitador térmico. En este precipitador se establece un gradiente térmico en un gas y esto trae como consecuencia la migración de partículas de la zona de alta temperatura hacia la zona de baja temperatura. Se nota una alta eficiencia de colección para partículas entre 0.001 y 100 micras. Este precipitador tiene la desventaja de tener una baja velocidad de sedimentación.
- Métodos centrifugos. Su funcionamiento general es el siguiente: el gas cargado de polvos se desplaza a una velocidad elevada, penetra tangencialmente en una cámara cilíndrica y toma un movimiento en espiral. La fuerza centrífuga dirige las partículas en suspensión hacia la pared del cilindro donde caen en una cámara de polvos. El gas depurado sale por un orificio de salida axial. Tienen buena eficiencia para partículas de más de 5 micras.
- Aparatos de impacto. Pueden funcionar tanto en medio húmedo como seco. Los que funcionan en medio húmedo recogen las partículas interceptadas por medio de una superficie recubierta por un líquido. Los aparatos en seco, recogen las partículas por impacto sobre una superficie seca. En los dos tipos, la depositación se hace por inercia. El rendimiento de la depositación aumenta cuando el diámetro de las partículas es igual o mayor que 1 micra. Para diámetros menores el aparato de impacto debe utilizarse con grandes velocidades.

## MUESTREO DE GASES Y VAPORES CONTAMINANTES

Los métodos de toma de muestra de gases y vapores se resumen en:

1. Toma de muestra de atmósferas en su estado original, - sin concentración notable de contaminantes.
2. Toma de muestra de atmósferas conteniendo gases y vapores por los métodos siguientes:
  - a) Absorción por reactivos químicos o disolventes contenidos en lavadores de diversos tipos.
  - b) Adsorción sobre carbón activado, gel de sílice u otros adsorbentes sólidos.
  - c) Condensación a baja temperatura por técnicas de congelación.
  - d) Adsorción a baja temperatura sobre una sustancia - que crea una interfase gas - líquido.

Veamos pues, con más detalle estos métodos.

### a) ABSORCION

Un aparato de muestreo por absorción se compone de: una sonda de vidrio, un tubo de acero inoxidable o de materia plástica inerte, un filtro para eliminar las partículas sólidas, - un borboteador de gas, un dispositivo de absorción, un rotámetro, un manómetro, un termómetro y una bomba de aspiración. - Con objeto de conseguir la máxima exactitud, es preciso además de medir las condiciones de presión y temperatura a que se hace el muestreo, comprobar periódicamente el filtro, el absorbedor, el medidor de caudal y el manómetro.

Absorción por líquidos. La absorción de un gas por líquido está determinada, en general, por el volumen de la muestra y por los factores siguientes:

- Grado de contacto entre el gas y el líquido.
- Duración de contacto entre el gas y líquido medido por el caudal del gas y por la longitud del recorrido del gas en el líquido.

- Velocidad de la difusión entre la fase gaseosa y la fase líquida.
- Coeficiente de solubilidad del gas en el líquido.
- Velocidad de la reacción química.
- Concentración de reactivo en la solución absorbente.
- Temperatura.

#### b) ADSORCION

La adsorción de un gas es una operación en la que un gas o vapor entra en contacto con un sólido de tal forma que sus moléculas se adhieren a la superficie del sólido; el material sólido es el adsorbente. La cantidad de gas a ser colectado depende de la superficie específica o superficie total por unidad de masa del adsorbedor. La mayoría de los adsorbentes comunes son más o menos granulares y usualmente soportados en columnas a través de las cuales el aire que se va a muestrear es inducido.

Los materiales comúnmente usados como adsorbentes son: carbón de leña, gel de sílice, alúmina, cloruro de litio, bauxita, tierra de Batán (tierra activada). El muestreo por adsorción no está completo con la colección, el gas debe ser removido de la columna para su análisis, esto puede hacerse calentando la columna, soplando aire a través de ella y colectando el gas de interés por absorción, o bien usando algún disolvente como agua, alcohol, acetona, ciclohexano y benceno. Según las propiedades químicas de la sustancia que se desea recuperar.

#### c) CONDENSACION

Los métodos de condensación tienen la ventaja de concentrar los gases y vapores y conservarlos en su estado natural. Esta técnica es útil cuando el gas considerado está muy diluido en la atmósfera y se desea obtener muestras altamente concentradas para examen por espectómetro de masas, cromatografía, etc. Es necesario hacer un filtrado previo para eliminar las

partículas en suspensión. La muestra de aire contendrá vapor de agua, hidrocarburos y otros contaminantes gaseosos, que si se dejan en la muestra y pasan a las zonas más frías, se condensarán y obturarán el aparato. Por esta razón, se deben separar mediante un filtro de lana, de vidrio o cualquier otro tipo. La elección de refrigerantes está limitada a aquellos que mantienen una temperatura uniforme por intercambio de fase en el baño frío. Algunos de los refrigerantes empleados en esta técnica son: agua y nieve ( $0^{\circ}\text{C}$ ), nieve y sal ( $-21^{\circ}\text{C}$ ), nieve carbónica ( $-79^{\circ}\text{C}$ ), aire líquido ( $-147^{\circ}\text{C}$ ) y oxígeno líquido ( $-183^{\circ}\text{C}$ ).

#### TECNICAS DEL ENSAYO DE MUESTREO EN CHIMENEAS

Para muestrear partículas hay que conocer aproximadamente la velocidad en la chimenea, para permitir las técnicas de muestreo más isocinéticas posibles; es decir, un muestreo en el cual el flujo de gas que entra en el dispositivo de muestreo, tiene la misma velocidad y dirección que la existente en el conducto de donde se toma la muestra. Hay varios instrumentos para medir la velocidad del aire con este fin. El tubo de Pitot normal conjuntamente con un manómetro de presión diferencial es el más usado.

El muestreo isocinético es deseable en la gama de tamaños de 3 a 5 micras y se hace necesario por encima de esta gama.

Un método de mantener condiciones isocinéticas, exige el uso de una serie de toberas de distintos diámetros, la velocidad de muestreo se mantiene constante y se elige la tobera en función de su diámetro interior de forma que armonice con la velocidad del conducto.

Esta técnica es especialmente ventajosa cuando el dispositivo de colector lleva consigo una caída de presión constante, tal como el impactor (sin filtro posterior) y cuando se usa en campo.

El muestreo isocinético se puede conseguir con sistemas de muestreo que usan un sólo tamaño de tobera. Esto se hace variando el flujo del sistema de muestreo en cada punto de muestreo, de forma que la velocidad en la tobera iguale a la velocidad en el punto de muestreo. Las medidas continuas del tubo de Pitot durante el muestreo son deseables para asegurar un muestreo isocinético. Estas condiciones isocinéticas se pueden conseguir también con el uso de toberas de "cero". Estas toberas tienen como principio que cuando el flujo a través de la tobera está ajustado de forma que las presiones a través de un manómetro se equilibran o alcanzan una condición "cero".

#### a) MUESTREO ISOCINETICO

Mientras que el mantenimiento de condiciones de muestreo isocinético no se requiere para la recogida de gases y aerosoles submicrométricos, es de primordial importancia para la recogida adecuada de partículas mayores de unas 3 micras.

Con objeto de conseguir condiciones de muestreo isocinético, es necesario de establecer condiciones tales que la velocidad de los gases a la entrada de la tobera sea igual a la velocidad de la corriente gaseosa en el conducto en el punto de muestreo. Si la velocidad a la entrada de la tobera de muestreo es mayor que la velocidad de la corriente gaseosa que la rodea, algunas de las partículas de polvo son desviadas de su camino normal y pasan dentro de la tobera. Como las fuerzas de inercia son menores en las partículas más finas, estas son desviadas más fácilmente dentro de la tobera, aumentando de esta forma el tanto por ciento de finos en la muestra.

Si la velocidad en la tobera de muestreo, es menor que la velocidad en la corriente gaseosa que la rodea, parte del gas es desviado alrededor de dicha tobera. En este caso, la fuerza de inercia sobre las partículas de polvo de mayor tamaño ocasionan que un número desproporcionado de las partículas mayores entren en la tobera y sean recogidas en la muestra.

La magnitud del error de muestreo depende de la distribución de tamaños de las partículas, del grado de desviación del flujo isocinético y de la velocidad de la corriente gaseosa - dentro de la chimenea; este error es debido a un flujo no isocinético.

#### b) MUESTREO PERIMETRAL

Este es un procedimiento usado para determinar la concentración neta de contaminantes. Esta concentración se obtiene - restando la concentración de los contaminantes viento arriba - de la concentración viento abajo. Este es el procedimiento más comúnmente usado para determinar "la concentración de los contaminantes a nivel de la tierra".

El método estándar utiliza el muestreo de un gran volumen de aire para determinar las partículas en la emisión.

Antes de iniciar propiamente el muestreo perimetral es necesario realizar algunas acciones preliminares. Tales como: de terminar los límites de la corriente a analizar, la dirección, velocidad y grados de fluctuación del viento. Este tipo de muestreo generalmente nunca se lleva a cabo cuando está lloviendo porque la lluvia altera la concentración de los contaminantes (la disminuye). La selección del sitio adecuado para llevar a cabo el muestreo perimetral es la parte más importante - para la realización correcta del muestreo.

Una vez terminadas todas las consideraciones anteriores - se procede al muestreo perimetral. Las emisiones de partículas de una corriente deberán ser medidas simultáneamente viento arriba y viento abajo usando calibradores muestreadores de gran volumen de aire. El muestreo de volumen de aire es el método - preferido de muestreo en situaciones en donde los contaminantes no son emitidos únicamente a través de chimeneas, sino que también se emiten a los lados de las construcciones, por los techos de ventilación u otro tipo de corrientes a nivel terrestres. Este método también resulta mejor en el muestreo de emi-

siones en donde existan una gran cantidad de chimeneas o efluentes en donde el muestreo individual resultaría impráctico. Los muestreos normalmente se llevan a cabo en 1, 3 ó 5 horas.

### 3.2. METODOS DE ANALISIS DE CONTAMINANTES

#### METODOS DE MEDICION DE DIOXIDO DE AZUFRE

##### a) METODO CALORIMETRICO DE WEST Y GACKE

###### PRINCIPIO:

El dióxido de azufre reacciona con el tetracloromercuriato (TCM) de sodio para formar el ión diclosulfitomercuriato, - que reacciona con la p-rosanilina decolorada en ácido y con el formol, dando una coloración rojo púrpura.

###### TECNICA:

El aire es aspirado a través de una solución de TCM de sodio. Se ajusta una solución de clorhidrato de p-rosanilina en ácido clorhídrico y una solución de formol. Se mide la densidad óptica de la solución en un espectómetro y se leen los resultados según una curva de calibración establecida con soluciones conocidas de sulfato de sodio anhídrico.

###### SENSIBILIDAD:

0.015 - 0.6 mg/m<sup>3</sup> (0.005 - 0.2 ppm), usando una muestra de aire de 38.2 L.

###### SUSTANCIAS PARASITAS:

El NO<sub>2</sub> y el ozono, falsean la reacción si están presentes en concentraciones superiores a las del dióxido de azufre. Las sales del hierro y otros metales pueden interferir, pero es fácil eliminarlas ajustando el absorbente de ácido etilendiamina tetracético.

##### b) METODO COLORIMETRICO AL CLOROANILATO DE BARIO

###### PRINCIPIO:

El cloroanilato de bario sólido reacciona con el sulfato a pH<sub>4</sub> y en solución alcohólica, para dar el ión cloroanilato f

cido ( $\text{HC}_6\text{Cl}_2\text{O}_4$ ), que es coloreado a rojo púrpura.

**TECNICA:**

El aire es aspirado a través de una solución de agua oxigenada. Se ajusta el cloroanilato de bario sólido, el etanol - al 95% y una solución tampón de eftalato ácido de potasio ( $\text{pH}_4$ ). El cloroanilato de bario en exceso y el sulfato de bario precipitado se eliminan por filtración y se mide la densidad óptica del cloroanilato ácido por espectrofotometría. La concentración de dióxido de azufre se determina con una curva obtenida con soluciones conocidas de sulfato potásico.

**SENSIBILIDAD:**

0.15  $\text{mg}/\text{m}^3$  (0.05 ppm) utilizando una muestra de aire de 1  $\text{m}^3$ . Rendimiento calidad 100%

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Fosfatos, cloruros y fluoruros.

**c) METODO COLORIMETRICO DE STRATMAN**

**PRINCIPIO:**

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) se reduce en sulfhídrico, que reacciona con el molibdato amónico para dar azul de molibdeno. La intensidad de la coloración se mide por fotometría.

**TECNICA:**

El  $\text{SO}_2$  presente en la muestra de aire se absorbe en un tubo de cuarzo sobre un gel de sílice especialmente preparado. El tubo se calienta a  $500^\circ\text{C}$  para desorber el  $\text{SO}_2$  y simultáneamente se hace pasar una corriente de hidrógeno a través del aparato. Los gases se hacen pasar a través de un tubo de catalisis conteniendo hilo de platino calentado a  $600^\circ\text{C}$ ; el hidrógeno sulfurado obtenido se envía a una aparato de vidrio tostado conteniendo una solución de molibdato amónico, ácido sulfúrico y urea. La intensidad de la coloración azul se mide en un fotómetro y la concentración del  $\text{SO}_2$  se lee en una curva patrón.

**SENSIBILIDAD:**

Alrededor de 28  $\text{mg}/\text{m}^3$ , cuando se usa una muestra de 30 l-

de aire. En concentraciones inferiores a  $200 \text{ mg/m}^3$ , la desviación típica es de  $\pm 11.2 \text{ mg/m}^3$ .

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Acido sulfúrico.

**d) METODO ACIDIMETRICO AL AGUA OXIGENADA**

**PRINCIPIO:**

El dióxido de azufre se arrastra por una solución de agua oxigenada, que lo oxida para dar ácido sulfúrico. La acidez se determina por filtración con una base.

**TECNICA:**

Se aspira el aire a través de una solución de agua oxigenada ajustada a pH5 en un borboteador. El ácido contenido en la solución es filtrado con hidróxido sódico, utilizando un indicador compuesto de vidrio de bromocresol y rojo de metilo en metanol.

**MODIFICACIONES A ESTE METODO**

Se determina la cantidad de carbonato sódico o ácido clorhídrico necesario para ajustar a pH4.5 la cantidad de agua oxigenada que se usa. Después de aspirar el aire del absorbente, se ajusta este mismo volumen con carbonato sódico o ácido clorhídrico. La acidez en exceso es tratada con una solución de carbonato sódico usando un indicador cuya coloración vira del rojo o gris, hasta el azul.

**SENSIBILIDAD:**

El ensayo mide la acidez total, límite inferior  $0.03 \text{ mg/m}^3$  (0.01 ppm), expresado en  $\text{SO}_2$ , usando una muestra de  $0.85 \text{ m}^3$  de aire. Exactitud  $\pm 10\%$  para concentraciones inferiores a  $0.3 \text{ mg/m}^3$  (en  $\text{SO}_2$ )

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Partículas sólidas, gases ácidos y amoníaco.

**e) METODO CONDUCTIMETRICO AL AGUA OXIGENADA**

**TECNICA:**

Se aspira el aire a través de una solución de agua oxige-

nada en un borboteador de 100 ml dotado de placas de platino - como electrodos. La conductividad se mide con un puente de Whe atstone, después de haber hecho una calibración con soluciones conocidas de ácido sulfúrico.

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Acidos, bases y sales solubles.

**f) MEDICION DE  $SO_2$  EN PRESENCIA DE  $NH_3$**

**PRIMER METODO:**

Se usan células de conductividad calibrada con soluciones conocidas de ácido sulfúrico y sulfato amónico, para medir la conductividad de dos muestras de absorbente: una conocida y la muestra a través de la cual se ha aspirado el aire. Se mide el ácido sulfúrico libre por valoración. Según las curvas de cali- bración los valores de conductividad y los resultados de valo- ración se determina la concentración de sulfato amónico presen- te en la muestra expuesta. Por lo tanto, se pueden calcular - las concentraciones de dióxido de azufre y de amoniaco presen- tes en la atmósfera.

**SEGUNDO METODO:**

La solución de absorbente expuesta se sitúa en una célula de conductividad, dotada de electrodos de platino y de un agi- tador magnético. La célula se sitúa en un punto de medida de - la conductividad y se detrmna el contenido en sulfato del ab- sorbente por valoración con una solución patrón de triclorato- de bario.

**SENSIBILIDAD:**

Límite inferior de concentración: 10 microgramos de sulfato para 10 ml de muestra.

**EXACTITUD:**

$\pm 10\%$ , cuando la concentración de  $SO_2$  es superior a 100 - microgramos/ $m^3$ .

**g) METODO DEL TIOSULFATO Y EL IODO**

**PRINCIPIO:**

El dióxido de azufre se oxida por una solución patrón de iodo, y el iodo en exceso es tratado con tiosulfato sódico.

**TECNICA:**

El aire se aspira a través de una solución de iodo - yoduro de potasio, almidón soluble muy puro y ácido sulfúrico, en un aparato de impacto normal. Posteriormente, la solución se valora con un patrón de tiosulfato sódico hasta una coloración azul claro.

**SENSIBILIDAD:**

0.007 mg/m<sup>3</sup> (0.0024 ppm) en una muestra de aire de 1 m<sup>3</sup>.

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

La presencia de óxidos da errores por defecto. El sulfhídrico y los agentes reductores tienen un efecto inverso.

**h) METODO POLAROGRAFICO**

**PRINCIPIO:**

El ácido sulfuroso se reduce sobre un electrodo de mercurio, determinándose la concentración de dióxido de azufre mediante un polarograma.

**TECNICA:**

El aire se aspira a través de una solución de hidróxido sódico y de glicerina en un aparato normal Greenburgh-Smith. El oxígeno disuelto se elimina de la solución absorbente y de una solución tampón de ácido acético y acetato sódico (pH alrededor de 3.9) purgando con nitrógeno; después se mezclan las dos soluciones en una célula electrolítica.

Se establece un polarograma mediante un polarógrafo dotado de un electrodo de gotas de mercurio, en un intervalo de -0.35 a -1.0 volts. Los resultados se determinan según una curva de calibración (dando la corriente de difusión con respecto a la concentración) establecida con soluciones conocidas de sulfite sódico anhídrico.

**SENSIBILIDAD:**

0.06 mg/m<sup>3</sup> (0.02 ppm) usando una muestra de aire pasando -

por 75 ml de solución con un caudal de 28 l/min. Durante 30 minutos. Exactitud:  $\pm 10\%$

SUSTANCIAS PARASITAS:

Oxidos de nitrógeno.

#### METODOS DE MEDICION DE MONOXIDO DE CARBONO

a) METODO DEL TUBO INDICADOR DEL NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, DE LOS ESTADOS UNIDOS

PRINCIPIO:

Se impregnan un gel de sílice de molibdato amónico y de una solución de paladio en ácido sulfúrico; se forma así un complejo de sílico-molibdato de paladio. El monóxido de carbono transforma este complejo en azul de molibdeno, siendo la intensidad de la coloración proporcional a la concentración de monóxido de carbono.

TECNICA:

Se pasa un volumen medido de aire a través de un tubo indicador que contiene sílico-molibdato de paladio. La concentración de monóxido de carbono se determina en función del volumen de aire, la duración de paso y el cambio de coloración (que varía de verde pálido a azul).

SENSIBILIDAD:

- a) El límite inferior para aparición de una coloración verde es de  $12.5 \text{ mg/m}^3$  (10 ppm) usando una muestra de aire de 0.25 l.
- b) Se puede detectar  $1.25 \text{ mg/m}^3$  (1 ppm) en una muestra de aire de 2.5 l, usando un caudal de 100 ml/min.

SUSTANCIAS PARASITAS:

Las sustancias orgánicas son capaces de reducir el gel indicador de azul de molibdeno.

b) METODO DEL PENTOXIDO DE IODO

PRINCIPIO:

A una temperatura de  $120 - 150^\circ\text{C}$ , el monóxido de carbono-

reacciona con el pentóxido de iodo para dar bióxido de carbono y iodo. El monóxido de carbono presente se puede calcular bien en función de la cantidad de iodo o por la cantidad de dióxido de carbono formado.

#### TECNICA:

Se hace pasar un volumen de aire conocido sobre el pentóxido de iodo contenido en un tubo especial y calentado en un horno eléctrico. Es preciso emplear una batería complicada de aparatos de purificación para eliminar los vapores orgánicos, el vapor de agua, el dióxido de carbono y las partículas sólidas. El aparato se debe purgar completamente con nitrógeno puro mientras se calienta el tubo de pentóxido de iodo, durante unos cinco días antes de usarlo. El iodo liberado se absorbe por una solución de ioduro de potasio en un frasco Gomborg y se dosifica por valoración iodométrica. Si se quiere medir el dióxido de carbono liberado, es preciso eliminar el iodo por absorción con ioduro de potasio cristalizado; el dióxido de carbono se absorbe por hidróxido bórico. La medición final del iodo liberado se puede hacer por colorimetría o por medida de la corriente producida en una célula Hersch.

#### SENSIBILIDAD:

El límite inferior de concentración es 1.4 - 3.5 microgramos de CO por muestra.

#### SUSTANCIAS PARASITAS:

Ninguna.

#### c) METODO DE ESPECTOMETRIA POR INFRARROJOS

Este es el método de referencia usado por la EPA para la medición de los estándares de calidad del aire ambiente en los Estados Unidos.

#### PRINCIPIO:

El método de la espectometría infrarroja no dispersiva está basado en la absorción de radiación infrarroja por el monóxido de carbono. El instrumento empleado contiene: dos células,

una patrón y otra para la muestra de aire; una fuente de radiación (consistente en dos hilos de cromoniquel calentados); un sistema óptico para el infrarrojo; un detector; un sistema de ampliación electrónica y un registrador.

Una fracción infrarroja pasa a través de la célula de la muestra y la otra pasa a través de la célula patrón; las dos fracciones convergen posteriormente en el detector. Cuando las intensidades de las radiaciones de las dos fracciones son iguales, el detector no emite ninguna corriente; sin embargo cuando se introduce una muestra de aire conteniendo monóxido de carbono, se reduce la intensidad de la radiación proveniente de esta célula. La diferencia resultante de las radiaciones de ambas fracciones crea una señal que es amplificada y registrada.

**SENSIBILIDAD:**

0.58 mg/m<sup>3</sup> (0.50 ppm).

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Ninguna.

**MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO**

Los óxidos de nitrógeno se determinan como NO<sub>2</sub> usando la variante Saltzman del método de Griess-Ilosvay. La EPA lo usa como método de referencia, tomando muestras durante 24 horas, en el punto en donde se desea conocer la inmisión, analizando posteriormente en el laboratorio, de ahí el nombre con el cual se designa este método: "24 hour sampling method".

**PRINCIPIO:**

El dióxido de nitrógeno se recoge por borboteo del aire a través de una solución de hidróxido sódico. El ión nitrito producido durante la toma de muestras se determina colorimétricamente, haciendo reaccionar el reactivo absorbido con ácido fosfórico, sulfanilamida y N-L-Naftilenamina diclorohidrato. La concentración de NO<sub>2</sub> se determina a través de una curva patrón

establecida con soluciones conocidas de nitrito sódico.

**SENSIBILIDAD:**

Alrededor de 1 microgramo por ml de reactivo absorbente - en el intervalo de concentración 0.01 - 10 mg/m<sup>3</sup> (0.005-5 ppm).

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Son perjudiciales el ozono y otros oxidantes.

**MÉTODOS DE MEDICIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO**

**a) MÉTODO DEL AZUL DE METILENO**

**PRINCIPIO:**

El ion sulfuro reacciona con la p-aminodimetilanilina y el cloruro férrico para dar azul de metileno, que se mide por espectrofotometría.

**TECNICA:**

El aire se hace pasar a través de una suspensión alcalina de hidróxido de cadmio en un aparato de impacto normal, se ajusta una solución de N, N-dimetil-p-feniladamina en ácido sulfúrico y una solución de cloruro férrico. La densidad óptica del azul de metileno se determina en un espectrofotómetro y la concentración de hidrógeno sulfurado se lee sobre una curva patrón.

**SENSIBILIDAD:**

0.05 microgramos/g por ml de solución de ensayo.

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Los agentes oxidantes.

**b) MÉTODO DEL SULFURO DE PLATA**

**PRINCIPIO:**

El sulfuro de hidrógeno se absorbe por una solución de arseniato sódico y carbonato amónico. El precipitado de sulfato amónico que se forma se transforma en precipitado de sulfato de plata, por adición de nitrato de plata. El sulfato de plata se reduce a sulfuro de plata, dando una solución pardo amarillenta, cuya intensidad permite medir la concentración de sul-

furo de hidrógeno.

**TECNICA:**

Se aspira el aire a través de dos absorbedores montados - en serie, conteniendo cada uno de ellos una solución de arse - niato sódico y carbonato amónico. Se ajusta el nitrato de pla - ta y se mide colorimétricamente la densidad de la solución; la concentración de sulfuro de hidrógeno se determina por una cur - va de comparación establecida mediante soluciones patrón de - tiosulfato sódico tratado con nitrato de plata.

**SENSIBILIDAD:**

1 microgramo por 5 ml de solución absorbente.

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Ninguna.

**MÉTODOS DE MEDICION DE COMPUESTOS FLUORADOS Y CLORADOS**

**a) MÉTODO DE LA LACA DE ALIZARINA PARA VALORAR FLUORUROS - MINERALES**

Los fluoruros decoloran una laca de alizarina-torio o ali - zarina-lantano; el grado de decoloración indica la concentra - ción de fluoruros.

**TECNICA:**

Se aspira aire a través de una solución de hidróxido sódi - co y agua oxigenada en un aparato de impacto normal. La mues - tra se evapora parcialmente para reducir su volumen y destruir las materias orgánicas; posteriormente se somete a un arrastre con vapor en presencia de ácido perclórico.

La acción decolorante sobre una de las lacas recomendadas anteriormente se mide con espectrofotómetro, determinándose la concentración de fluoruros según una curva patrón preparada - con soluciones conocidas de fluoruro sódico.

**SENSIBILIDAD:**

Límite inferior de concentración: 0.6 microgramos/m<sup>3</sup>.

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

Ninguna.

**b) METODO NEPELOMETRICO DE VALORACION DE CLORUROS**

**PRINCIPIO:**

Los cloruros presentes en una muestra se precipitan en forma de cloruros de plata que es medido por nefelometría.

**TECNICA:**

La muestra se recoge haciendo pasar 2 m<sup>3</sup> de aire a través de agua destilada exenta de cloruros en un pequeño aparato de impactos. Las partículas sólidas en suspensión se eliminan por filtración en papel filtro Whatman N° 42 o equivalentes. El filtrado se trata con una solución de nitrato de plata en ácido nítrico diluido. El cloruro de plata se valora por nefelometría en un espectrofotómetro y la concentración de cloruros se determina según una curva patrón establecida a partir de soluciones que contienen cantidades de cloruro sódico del orden de microgramos.

**SENSIBILIDAD:**

1 microgramo de cloro por 2 ml de solución examinada al microscópio.

**SUSTANCIAS PARASITAS:**

El resto de ácidos, principalmente el HNO<sub>3</sub>.

## CAPITULO IV

### SISTEMAS DE CONTROL DE CONTAMINANTES

#### 4.1. ELIMINACION DE LOS GASES DE DESECHO

Partiremos del supuesto, de que la corriente de gas no contiene partículas, pero sigue siendo un problema de contaminación del aire y para ello tenemos que diseñar métodos para hacer que dicha corriente resulte aceptable en la atmósfera. Entre los gases nocivos están, por ejemplo, los que contienen altas concentraciones de anhídrido sulfuroso ( $SO_2$ ), óxidos de nitrógeno, hidrocarburos u otros contaminantes atmosféricos que se originan en los procesos y operaciones de fabricación del hierro y el acero.

El problema de la eliminación de los gases de desecho generalmente es cuestión de cantidad. Esto significa que la concentración de los contaminantes en las emisiones de gases suelen ser bajas, pero la cantidad total de las emisiones es grande. Por esta razón resulta muy caro eliminar o destruir el contaminante, ya que todos los gases desprendidos tienen que tratarse como si fueran contaminantes, aunque la mayor porción esté constituida por gases inertes. Por ejemplo, supongamos que se trata de humos que contienen 100 ppm de HCl en 2350 litros/seg de aire. Aunque 100 ppm es una cantidad muy pequeña de contaminante, es muy superior a las 5 ppm especificadas como límite umbral aceptable para el HCl, lo cual significa que debe reducirse la concentración por lo menos 20 veces antes de liberarlo a la atmósfera.

Para hacerlo hay que tratar no sólo las 100 ppm de HCl sino también los 2350 litros/seg de aire. El tratamiento de este gran volumen es precisamente lo que resulta caro, no el del contaminante.

Las escasas alternativas con que se cuenta para el trata-

miento de un gas de desecho son:

1. Dispersión.
2. Absorción en un medio seco o húmedo.
3. Adsorción.
4. Incineración u otros métodos de oxidación.
5. Condensación.

#### 1. DISPERSION CON CHIMENEAS

Es el método más antiguo para manejar un gas nocivo. En un principio las chimeneas se idearon para que saliera el humo del interior de las casas, la chimenea actuaba como generador de corriente de aire que arrastraba una suficiente cantidad para mantener la combustión activa, ya sea que se quemara madera, carbón, petróleo o gas.

La chimenea alta, a diferencia de la baja en una industria es una herramienta que se puede utilizar para reducir concentración de contaminantes gaseosos a nivel del suelo, descargándolos a una altura en la que tenga lugar suficiente la dispersión, de tal modo que la concentración a nivel del suelo en cualquier punto no muy lejano a la base de la chimenea no excederá a la concentración tolerada. Por lo tanto, la chimenea alta se puede considerar más bien, como un dispositivo de control de la contaminación a nivel del suelo, en vez de una forma de control de la contaminación del aire, ya que no disminuye ni un grano la cantidad de gas nocivo descargado en la atmósfera. En la actualidad las chimeneas se emplean sólo como un último recurso para eliminar gases contaminantes, que resultaría extraordinariamente difícil o caro tratar. El gas nocivo más importante que desprenden las chimeneas altas es el anhídrido sulfuroso ( $SO_2$ ), procedente de fundidoras principalmente y de plantas termoeléctricas; este tipo de chimeneas suelen medir de 45 a 152 m de altura. Las chimeneas altas están diseñadas para pasar el nivel de inversión, dispersando así el gas nocivo en un punto en que no quede atrapado en la capa de in-

versión, lo que acarrearía una precipitación inmediata.

La capa de inversión tiene un efecto significativo en el funcionamiento de la chimenea. La atmósfera normal debe disminuir 1 °C de temperatura por cada 100 m de altura. Es lo que se llama gradiente adiabático. Una noche despejada, la tierra se enfría por irradiación y el gradiente adiabático puede llegar a ser de cero o incluso producirse una temperatura más alta al aumentar la altura. Cuando al día siguiente, el sol comienza a calentar la tierra, la temperatura del aire también sube y el aire estable de la capa de inversión, hará que el humo de la chimenea que no atravieza la capa descienda al suelo en vez de elevarse, produciéndose concentraciones a nivel de la tierra 10 a 20 veces mayores de las previstas.

## 2. ABSORCIÓN Y REACCIÓN QUÍMICA

Este proceso puede efectuarse con o sin reacción química. Por ejemplo, las emisiones que tengan cloruro de hidrógeno se pueden lavar con agua para formar ácido clorhídrico, en solución débil, al ser absorbido por el agua. Por otra parte, si se desea hacer absorción y neutralización al mismo tiempo, se puede lavar con una débil solución de hidróxido de sodio o de hidróxido de calcio, para obtener como productos finales, cloruro de sodio o de calcio respectivamente. En un caso se tiene un sistema de verdadera absorción, en el otro una reacción química.

La absorción o la reacción de los productos de las emisiones gaseosas no se limita a métodos de contacto líquido-gas. Los gases se pueden atrapar o hacer reaccionar pasándolos por capas de relleno químico sólidas, en las que tenga lugar la reacción. En resumen, existen dos formas: contacto líquido-gas y gas-sólido, tanto para la absorción como para la reacción química.

**EQUIPO DE ABSORCIÓN.** El equipo empleado para la absorción o la reacción química de los gases contaminantes es muy simi -

lar y en muchos casos idéntico al usarlo para eliminar partículas por la vía húmeda. Los aparatos de gases absorbedores de gases empleados en la mayoría de los procesos industriales de desechos son principalmente de cuatro tipos diferentes:

a) COLUMNAS RELLENAS. Generalmente se fabrican de material resistente a la corrosión. Consisten en una columna vertical con una o más secciones rellenas que contienen un relleno de algún material de cerámica, metal o plástico, que proporciona una gran área superficial de contacto por unidad de volumen. El gas emitido, normalmente de aire con contaminantes, sale por la parte superior de la torre y la solución se recibe en el fondo.

b) COLUMNAS DE PLACAS. Se emplean, cuando se prefieren cantidades pequeñas de líquido, sobre todo cuando el gas contiene pequeñas cantidades de compuestos muy solubles. En la columna de placas, debido al mecanismo de distribución, se pueden usar cantidades menores de solvente líquido para la absorción de pequeñas cantidades de soluto en forma de vapor o gas.

c) SISTEMAS DE BURBUJEO DENTRO DE UN LIQUIDO. En general se usan, cuando la proporción de gas es grande y hay que distribuirlo en un volumen grande de líquido. En ciertos aparatos no son aplicables a los gases contaminantes, pero se pueden emplear cuando el gas o vapor contaminante es muy soluble.

d) TORRES DE ROCIAMIENTO. Se usan normalmente para reducir la temperatura de un gas contaminante en la forma más económica. Cuando se rocían, en forma de gotitas muy finas, grandes cantidades de agua o de otro absorbente en una torre o cámara y se ponen en contacto con el gas, tiene lugar absorción del vapor o gas soluble en el interior de la cámara.

### 3. ADSORCION

Es un fenómeno de superficie molecular en el que las moléculas de un fluido se ponen en contacto con la superficie de -

un sólido y se adhieren a ella, en estos procesos los gases orgánicos se pueden captar selectivamente o eliminar de las corrientes de aire por medio de adsorbentes específicos.

Para que un material sea un buen adsorbente debe tener una proporción superficie/volumen grande, ya que el fenómeno tiene lugar en la superficie del material. Es la magnitud del área superficial, más que su naturaleza específica, la causante primordial de la capacidad de adsorber grandes cantidades de moléculas orgánicas.

Los adsorbentes que se emplean para el control de la contaminación del aire constan de diversos tipos de material: carbón activado, gel de sílice, alúmina y bauxita.

Por razones prácticas el carbón activado es el único que se emplea más para eliminar los vapores orgánicos de las emisiones gaseosas industriales. Aunque con gel de sílice también se pueden eliminar, sólo son eficaces cuando no hay agua presente, porque el gel de sílice también es deshidratante y tiende a captar el agua mucho más rápidamente que las moléculas orgánicas. La alúmina y la bauxita también se emplean especialmente para la deshidratación del aire y de gases diversos.

#### 4. INCINERACION

La destrucción de un gas o vapor contaminante por medio de un proceso de combustión se llama incineración. Actualmente es el método más usado para la destrucción de los vapores orgánicos emanados de una industria.

El problema más frecuente para el tratamiento de las emisiones gaseosas es su volumen total. Generalmente la concentración del contaminante es bastante baja, pero el volumen de las emisiones es grande. En consecuencia, se presenta un problema orientado hacia el volumen más que hacia el contaminante.

En la incineración, al igual que en otros equipos de tratamiento de gases, es necesario conocer varios datos antes de-

empezar a diseñar el sistema:

- 1) Temperatura.
- 2) Volumen.
- 3) Componentes químicos.
- 4) Punto de condensación.
- 5) Concentraciones de los contaminantes tolerados en la atmósfera.

Hay tres sistemas de incineración:

a) **INCINERACION DE FLAMA DIRECTA.** Es el método usado normalmente cuando hay que tratar materiales gaseosos de desecho que están en el límite inferior de combustión al mezclarse con el aire, o bien cerca de este punto. También se emplea cuando las emisiones gaseosas son una mezcla combustible sin adición de aire.

b) **INCINERACION TERMICA.** La mayoría de los problemas de incineración de gases incluyen una mezcla de materia orgánica y aire en la que la cantidad de la primera es muy pequeña. Si se inyecta este gas directamente en un quemador, la cantidad de gas combustible deberá ser muy alta.

Las tres "T" de la combustión son de importancia primordial en los sistemas de incineración térmica. Son: tiempo, temperatura y turbulencia. El tiempo se refiere al período de estancia en el incinerador o el lapso requerido para la combustión completa de los gases. Temperatura, es a la que trabaja el incinerador al que debe de enviarse las emisiones para que logren una combustión completa. Turbulencia, es la mezcla que se efectúa dentro del incinerador entre las emisiones de gas y el aire que proporciona el oxígeno para la combustión.

c) **INCINERACION CATALITICA.** Se usa generalmente en emisiones gaseosas con bajas concentraciones de materiales combustibles y de aire. Los catalizadores empleados en el tratamiento de las emisiones gaseosas de desecho son en general, metales nobles, como platino o paladio, dispersos en alguna forma de -

vehículo del catalizador que se puede distribuir fácilmente en el flujo de las emisiones del gas. Los catalizadores comerciales se presentan en cuatro formas:

- 1) Tamiz de tela metálica.
- 2) Cilindros huecos y delgados de alúmina.
- 3) Pequeños cilindros o bolitas de alúmina.
- 4) Dispositivos en forma de colmena, hechos de alúmina.

En todos los casos el metal noble se deposita en estos soportes que están colocados en la ruta de la corriente del gas.

#### 5. CONDENSACION

En general, se usa la condensación cuando las emisiones gaseosas de una industria tienen cantidades abundantes de un compuesto condensable, como en el caso del aire saturado de agua u otro vapor. Se considera como un método de tratamiento previo a otros sistemas para eliminar vapores solventes. Por ejemplo, un solvente caro se vaporiza en un horno con una temperatura de descarga de  $93^{\circ}\text{C}$ . El solvente se encuentra en una gran cantidad de aire, si se le hace pasar por un condensador de superficie que se enfríe con agua hasta  $26.7^{\circ}\text{C}$ , se puede recuperar aproximadamente la mitad del solvente en forma económica. El resto hay que recuperarlo con adsorción en carbón activado o por un proceso de refrigeración.

#### 4.2. MEDIDAS DE MANTENIMIENTO NECESARIAS PARA EVITAR LOS CONTAMINANTES

Se puede decir que en general, mantenimiento es el conjunto de actividades desarrolladas con el objeto de conservar las propiedades de una empresa en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico.

Se da mantenimiento a las propiedades físicas de la empresa que se enlistan a continuación:

1. Maquinaria y equipo.
2. Instalaciones en general.

**3. Edificios.**

- a) Oficinas.
- b) Talleres, naves, etc.
- c) Almacenes, bodegas, etc.

**4. Areas de servicio.**

- a) Patios.
- b) Estacionamientos.
- c) Accesos de carga y descarga, etc.

Desde el punto de vista técnico tenemos tres tipos de mantenimiento:

- 1) Preventivo.
- 2) Predictivo.
- 3) Correctivo.

Para tener una visión de la relación que existe entre estos tipos de mantenimiento y la vida activa de nuestros aparatos de control, tenemos la gráfica 4.2.1, donde se pone de manifiesto la importancia de dar mantenimiento a los aparatos de control.

**MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

Se realiza antes de que se presente la falla y si se implanta un buen programa de mantenimiento, la vida del equipo se prolonga. Este tipo de mantenimiento involucra una inspección periódica del equipo.

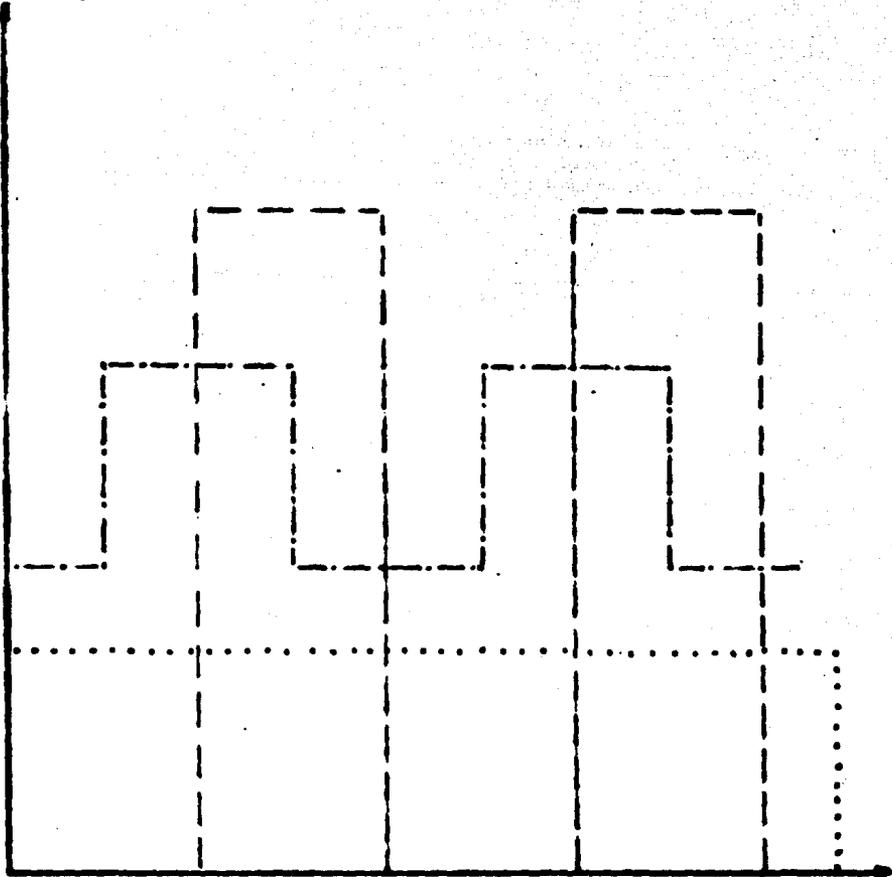
Desde el punto de vista económico, el mantenimiento preventivo se divide en dos:

- 1. Mantenimiento preventivo directo. Se revisa directamente la sección específica.
- 2. Mantenimiento preventivo indirecto. Al revisar una sección específica se aprovecha la ocasión para hacer revisiones adyacentes.

**MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

Involucra la corrección de las fallas en el momento preciso en que se presentan; es decir, este tipo de mantenimiento -

Volumen de trabajo



Gráfica 4.2.1.

t (años)

- El área bajo esta curva representa mantenimiento correctivo, son reparaciones mayores.
- Esta curva nos indica reparaciones por etapas periódicas o mantenimiento predictivo.
- ..... El área bajo esta curva indica mantenimiento preventivo, es un mantenimiento continuo.

sólo se lleva a cabo al mismo tiempo que falla el equipo. Como puede deducirse fácilmente este tipo de mantenimiento es el menos eficiente.

#### **MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

Se basa en datos estadísticos del equipo o la máquina y se indica así cuándo debe hacerse mantenimiento a los aparatos.

#### **ACTIVIDADES DEL MANTENIMIENTO**

1. **INSPECCION.** Se refiere a la detección de posibles fallas y revisión general de los aparatos. Las fallas pueden ser:

- a) Fallas mecánicas.
- b) Fallas por acumulación.
- c) Fallas por fugas.
- d) Fallas por variación.
- e) Fallas por regulación.

2. **CAMBIO.** Es sustituir componentes y elementos de los aparatos que por algún motivo han fallado. Los componentes se clasifican como sigue:

- a) Elementos reparables.
- b) Elementos no reparables.
- c) Elementos de rotación.

Fases para efectuar el cambio:

- a) Reparación.
- b) Remoción.
- c) Instalación.
- d) Ajuste.
- e) Pruebas de funcionalidad.

3. **SERVICIO.** El objetivo es mantener la buena apariencia y el buen funcionamiento de los elementos. Se divide en:

- a) Limpieza y ajuste.
- b) Lubricación.
- c) Tratamiento anticorrosivo.
- d) Desinfección.

- e) Pintura.
- f) Probar los aparatos con carga.

4. MODIFICACION. Es la reducción o eliminación de fallas-repetitivas, mediante la alteración del diseño original; tenemos las siguientes fases de trabajo:

- a) Diseño de la modificación.
- b) Fabricación.
- c) Instalación.
- d) Pruebas.

5. REPARACION. Es mantener el correcto funcionamiento mediante la corrección de fallas sin recurrir al cambio de unidades o elementos. Las fases de reparación son:

- a) Preparación.
- b) Ejecución.

#### VENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

- 1) Menores tiempos muertos.
- 2) Mayor seguridad.
- 3) Mayor calidad en el aire depurado.
- 4) Mayor vida útil de los aparatos.
- 5) Carga de trabajo uniforme.
- 6) Mayor capacidad de inventarios.
- 7) Se abaten los costos considerablemente.

#### MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION INDUSTRIAL

El sistema de distribución y el equipo eléctrico no requieren atención extraordinaria para su buen funcionamiento, sin embargo deben ser objeto de atención metódica. Un sistema de examen, ajuste y reparación, es el que aconseja el programa de mantenimiento preventivo que asegurará la continuidad del servicio.

En la conservación de aparatos eléctricos, como por ejemplo precipitadores electrostáticos, etc., se siguen los siguientes procedimientos:

- a) Anotar las horas en que los aparatos están fuera de servicio y notificar al departamento eléctrico cuando se vaya a efectuar cualquier trabajo de inspección o reparación, a fin de aprovechar el momento para inspeccionar al mismo tiempo el equipo eléctrico.
- b) Crear y mantener una reserva de partes y refacciones a fin de hacer cambios rápidos.
- c) Mantener limpias, secas y en buen estado las unidades de reserva y piezas de repuesto para utilización rápida.
- d) Llevar una lista de las averías y reparaciones efectuadas a fin de descubrir los casos crónicos y determinar sus causas.
- e) Realizar inspecciones con la regularidad y minuciosidad que lo permitan las circunstancias.

La vida útil de un aparato está en función del mantenimiento proporcionado. Se les designa vida útil a los siguientes elementos:

- 1) Piezas de compleja construcción.
- 2) Aquellas cuya falla sea peligrosa.
- 3) Aquellas cuya falla origina fallas menores.
- 4) Aquellas de difícil acceso y función importante.
- 5) Aquellas de bajo precio y función importante.

#### **APLICACION INMEDIATA DE MANTENIMIENTO**

- a) Equipos automáticos.
- b) Aparatos de operación continua.
- c) Aparatos de alta peligrosidad.

#### **RECURSOS TECNICOS PARA EL MANTENIMIENTO**

- a) Recomendación del fabricante.
- b) Recomendación de otras empresas.
- c) Experiencias propias.
- d) Análisis de ingeniería.

#### **PERIODICIDAD O FRECUENCIA PARA EL MANTENIMIENTO**

- a) Tiempo de operación.
- b) Tiempo de calendario.
- c) Operaciones especiales.
- d) Combinado.

#### PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

1. Elaborar censo o inventario del equipo.
2. Establecer un sistema de control.
3. Programar inspección periódica.
4. Procedimiento para efectuar las conservaciones:
  - a) Adquisición de refacciones y herramientas.
  - b) Atención de personal adecuado y capacitado.
  - c) Disposición del tiempo de la máquina o aparato.
5. Labor de estadística, información acumulada, clasificada y ordenada.

El mantenimiento o cuidado del equipo es fundamentalmente económico y, por lo tanto, una de las actividades más importantes de la Ingeniería.

#### 4.3. OPERACIONES ADECUADAS PARA EVITAR LOS CONTAMINANTES

Indicaremos algunas operaciones adecuadas para evitar los contaminantes en cada una de las fases de fundición:

1. RECEPCION, ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION DE MATERIAS PRIMAS. Es conveniente transportar las materias primas (que básicamente son: cal, carbón, mineral de hierro, chatarra y caliza) en recipientes cerrados. Cuando se depositan estos materiales en forma de pilas en los patios abiertos de la planta se les debe rociar agua por medio de espreas para evitar la propagación de polvos y partículas que ocasiona el viento. Posteriormente, durante la manipulación, hay que estén húmedas las materias primas (con excepción de la chatarra), para que no se levante polvo en exceso.

2. SINTERIZACION. Como en el sinterizado se manejan pol -

vos es conveniente transportarlos a lugares en donde no haya corrientes fuertes de aire. Durante el proceso hay emisión de gases (anhídrido sulfuroso,  $SO_2$ ; monóxido de carbono,  $CO$ ; óxidos de nitrógeno,  $NO_x$ ; fluoruros,  $F^-$ ) los cuales no se pueden evitar, pero sí controlar mediante el equipo de control adecuado.

3. COQUERIAS E INSTALACIONES DE RECUPERACION DE SUBPRODUCTOS. En este proceso es conveniente triturar la hulla, que es la materia prima fundamental, a tamaños máximos de 3 mm lo cual nos va a generar partículas, mismas que abatiremos mediante un aparato de control adecuado para recolectar este diámetro de partículas. Para evitar que los contaminantes gaseosos que se emiten en este proceso salgan a la atmósfera, se instala un equipo de aspiración que puede consistir en una campana y ventilador adecuados y posteriormente conectados a un equipo de control.

4. PROCESO DE APAGADO DEL COQUE. El coque incandescente que llega a la torre de apagado se riega con grandes cantidades de agua formándose una gran nube de vapor de agua y gases calientes que arrastran partículas a la atmósfera. Una manera para evitar la formación de vapor de agua, sería dejar enfriar el coque al medio ambiente; pero por razones obvias, esto es antieconómico. Así que, para evitar que salga a la atmósfera, esta nube de contaminantes se dirige hacia un cambiador de calor donde se condensa el vapor de agua y, los gases no condensables (por tener una temperatura de rocío menor) se transportan a un equipo de control adecuado.

5. ALTO HORNO. En el alto horno se producen los siguientes contaminantes: partículas, anhídrido sulfuroso ( $SO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ). En este proceso los gases contaminantes producidos durante la elaboración de arrabio o acero son guiados hacia una campana o medio de captación y de ahí transporta

dos a un sistema de depuración de partículas y gases.

6. CONVERTIDORES. Se emiten partículas y se abaten de la misma manera que para los casos anteriores.

7. HORNO ELECTRICO. Igual que el convertidor.

8. HORNO MARTIN-SIEMENS. Se emiten en este proceso: polvos,  $SO_2$ , ácido fluorhídrico (HF) y humos rojos si se inyecta oxígeno. El sistema de evacuación de gases debe pasar por los generadores y de ahí a una caldera de recuperación de calor seguida de un sistema colector de polvos de especificación adecuada.

9. COLADA CONTINUA. No se emite nada (sus emisiones se encuentran en un nivel tan bajo que no se consideran como contaminantes).

10. LAMINACION EN CALIENTE Y EN FRIO. En esta fase de la operación se desprenden vapores ácidos durante el decapado: ácido clorhídrico (HCl) y vapor de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ); y durante el galvanizado, vapores de zinc. En este proceso lo más importante que debemos cuidar es que los sistemas de captación posean recubrimientos anticorrosivos.

11. TRATAMIENTOS TERMICOS. En esta operación se producen vapores y humos. Se pueden reducir colocando un cambiador de calor y de ahí mandarlo al equipo de control correspondiente.

NOTA IMPORTANTE. Es preciso asegurarse que la presión interior del edificio en donde se trabaje sea superior a la del exterior para que de esta manera se evite, en primer lugar, que se regresen los contaminantes de escape al recinto; y, en segundo lugar, evitar colocar motores de extracción demasiado grandes. Se ha demostrado que los sistemas de suministro de aire han dejado bien sentado que son una inversión que merece la pena.

#### 4.4. EQUIPOS DE CONTROL RECOMENDADOS PARA ESTE TIPO DE PROCESOS

#### 4.4.1. CICLON

Este tipo de separador de polvos, ofrece uno de los procedimientos menos costosos ya que son dispositivos de fácil construcción, bajos costos de mantenimiento y bajos costos de inversión.

Los ciclones se han empleado para separar sólidos y elementos húmedos. Pueden operar a temperaturas tan altas como  $1,000^{\circ}\text{C}$  y presiones de 500 atm. (Es el caso de ciclones de muy alta eficiencia y calidad, tanto en su construcción, como en la naturaleza de sus materiales de fabricación).

Ocasionalmente se han obtenido rendimientos de hasta 98% en la recolección de partículas de polvo de menos de 5 micras de diámetro, pero esto ha sido posible en caso de que exista un elevado grado de aglomeración o bien, cuando se tienen concentraciones de polvo muy grandes (más de  $230 \text{ g/m}^3$ ).

La forma más común de un ciclón es del tipo de flujo de retorno, cuyos parámetros de construcción se muestran en la figura 4.4.1.1.

La nomenclatura de estos parámetros es:

$D_c$  ----- Diámetro mayor del cilindro

$L_c = 2D_c$  ----- Longitud máxima del cilindro

$Z_c = 2D_c$  ----- Longitud del cono

$D_e = D_c/2$  ----- Diámetro del ducto de salida del gas

$H_c + S_c = 5/8 D_c$  ----- Longitud del ducto de salida

$H_c = 0.5 D_c$  ----- Altura del ducto de entrada del gas

$B_c = 0.25 D_c$  ----- Ancho del ducto de entrada del gas

$J = 0.25 D_c$  ----- Diámetro del ducto de salida de polvos

Cuando se manejan partículas muy pequeñas y se requiere de una alta eficiencia, suelen montarse varios ciclones en paralelo, los cuales dan el índice total de flujo (multiciclón) y pueden tener una sola tolva de polvos común a todas las unidades.

No obstante que la configuración geométrica del ciclón es

simple, el estudio del flujo de aire en el "vórtice" es extremadamente complejo y la teoría de cálculo de la caída de presión o la eficiencia de separación de polvos es consecuentemente muy difícil. El flujo de gas entra al ciclón y por efecto de la fuerza centrífuga es proyectado hacia la pared de éste, descendiendo hacia la cámara en una espiral de flujo por un camino adyacente a la pared.

La espiral de salida realiza regularmente de 2 a 10 vueltas en la parte alta del ciclón. De esta espiral externa, el gas fluye girando hacia adentro en un patrón helicoidal (hacia una espiral de retorno central moviéndose a la parte superior del ducto de salida).

La velocidad de rotación del gas aumenta hacia el eje del ciclón, excepto en un núcleo central que rota como un sólido con una velocidad angular constante. El diámetro de este núcleo central, es aproximadamente la mitad del diámetro del núcleo de salida del gas. Algunos autores como Wellmann (1938) y Stairmand (1951), Shepherd y Lapple (1939) han descrito una doble circulación que disminuye la eficiencia de colección, tal como lo indica la figura 4.4.1.2. Otro fenómeno que dificulta o disminuye la capacidad de colección, es una circulación secundaria que se presenta en la tolva de polvos y se manifiesta en el flujo de retorno dentro del núcleo central de la espiral ascendente con dirección hacia el ducto de salida (figura 4.4.1.3). Para minimizar este flujo, suelen usarse deflectores como el presentado en la figura 4.4.1.4.

Según Lapple, la caída de presión dentro de un ciclón puede ser determinada según la relación:

$$\Delta P = \frac{13 \rho_g U_1^2 A_1}{2g D_o^2}$$

----- Ec. 4.4.1.1.

Donde:

$D_o$  = Diámetro del ducto de salida

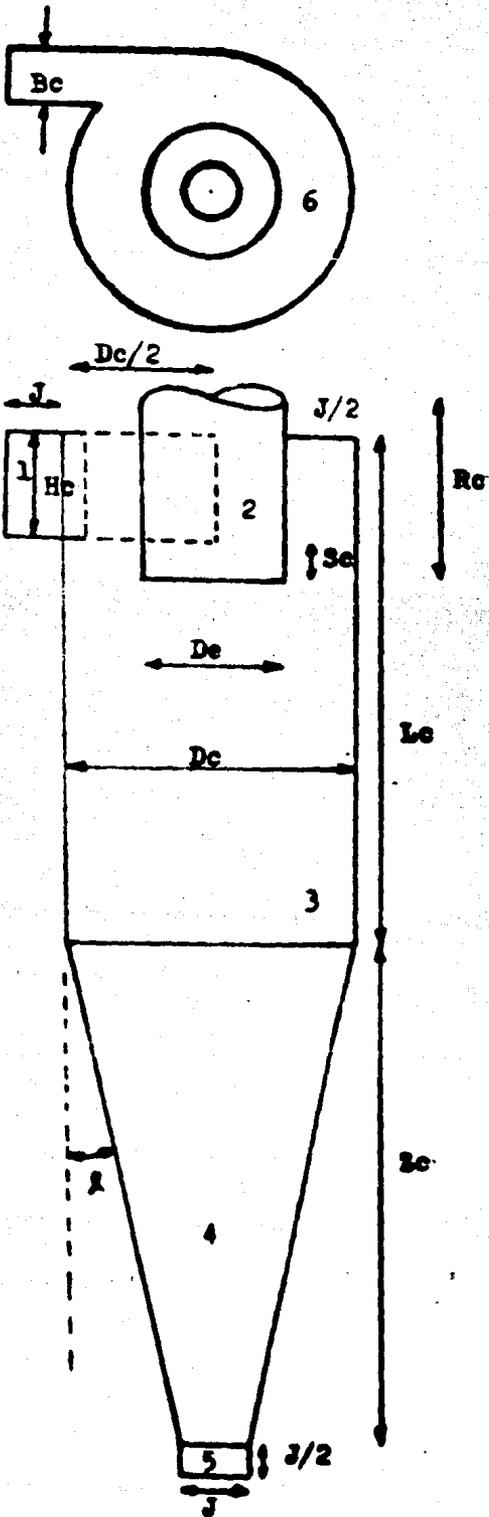


Figura 4.4.1.1

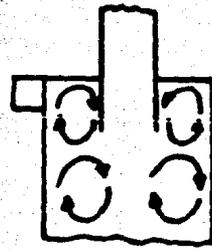


Fig. 4.4.1.2.

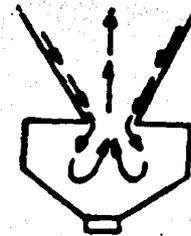


Fig. 4.4.1.3.

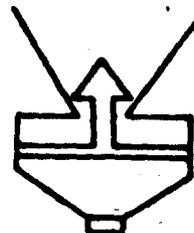


Fig. 4.4.1.4.

$\rho_g$  = Densidad del gas

$U_1$  = Velocidad del gas de entrada

$A_d$  = Area del ducto de entrada

La eficiencia de colección de partículas, depende principalmente de los diseños específicos de las unidades, de la densidad y tamaño de las partículas y del flujo de gas.

Lapple, correlacionó la eficiencia de colección, en términos del tamaño de corte  $D_{pc}$ , que es el diámetro de las partículas que son colectadas con un 50% de eficiencia.

$$D_{pc} = \frac{9 \mu_g Sc}{2 N_0 K U_1 (\rho_p - \rho_g)} \quad \text{----- Ec. 4.4.1.2}$$

Dependiendo de la eficiencia requerida, se puede determinar el tamaño de partícula por medio de la gráfica que relaciona a la eficiencia de colección y al cociente de  $D_{pc}/D_p$ , siendo  $D_p$  el diámetro de la partícula colectada.

Un multiciclón puede proporcionar una eficiencia más alta que un sólo ciclón de tamaño grande, pero tiene el inconveniente de que ocupa un mayor espacio y finalmente repercute en un aumento de los costos. Puede presentarse el caso de coleccionar partículas líquidas o húmedas, para lo cual el ciclón está provisto de un sistema de drenaje para coleccionar la capa líquida.

La selección de un buen ciclón para un caso particular, involucra la consideración de algunos parámetros importantes, tales como: la eficiencia de colección, el espacio ocupado por el ciclón, costo inicial y costo de operación (relacionado con la caída de presión). Las relaciones un tanto complejas entre estos parámetros, aunadas al número de variables de diseño, hacen que la selección no sea tan simple.

Modernos diseños del tipo como largo ( $L = 3$  a  $4 D_c$ ) son preferidos si el espacio lo permite y dan incrementos en la eficiencia, con un pequeño aumento en la caída de presión, com-

parados con los diseños "compactos y robustos" que son vistos frecuentemente.

#### 4.4.2. LAVADORES VENTURI

En el lavador Venturi el gas sucio se hace pasar por una garganta rectangular o redonda a velocidades altas. El líquido limpiador se introduce en la garganta (vena contracta) del Venturi por boquillas gruesas. El gas a velocidades de 183.5 a 732.3 Km/hr; al pasar por la garganta choca con el líquido haciendo que se formen gotitas muy finas. La turbulencia resultante es grande y la mezcla muy compleja. Debido a las grandes velocidades del gas, el Venturi es el más completo de todos los lavadores.

La eficiencia colectora del lavador Venturi es directamente proporcional a la energía consumida. Con gastos de energía de 7.6 a 25.4 cm de agua manométrica, la eficiencia colectora es comparable a la de un ciclón húmedo. A caídas de presión de 76.2 a 25.4 cm de agua manométrica, la eficiencia supera a todos los demás lavadores.

##### LAVADOR CON FLUJO DE GAS HORIZONTAL

En este se introduce el líquido por medio de boquillas gruesas a dos lados de una garganta rectangular.

Los cambios rápidos en la velocidad del gas, en su presión y en la temperatura propician la condensación de la humedad en el polvo. El polvo acelera su marcha al reducirse la sección transversal del Venturi y es lanzado al remolino de la garganta a la velocidad del gas o casi a la misma.

Esta enorme velocidad aumenta la captura del polvo por choque con las gotitas de agua. Al subir la velocidad de las gotas de cero a la velocidad del gas en la sección difusora más ancha del Venturi, el polvo libre alcanza a las gotas que van a una velocidad relativamente menor.

La captura del polvo fino por las pequeñas gotitas mediante el mecanismo de difusión, aumenta a medida que las velocidades relativas del polvo y de las gotas se aproximan a cero.

En el Venturi horizontal la fase de la extracción de la humedad del gas generalmente se lleva a cabo con un deshumidificador de entrada tangencial y de fuerza centrífuga.

#### CONSTRUCCION ESPECIAL O ALTERNATIVA

Para mantener una eficiencia alta con menor velocidad de gas, los Venturis tienen una garganta variable. La anchura de esta garganta se puede controlar manual o automáticamente.

#### LAVADOR VENTURI VERTICAL CON FLUJO DE GAS HACIA ABAJO

La figura 4.4.2.1 presenta un lavador Venturi en el que el líquido lavador entra en la sección más estrecha del Venturi por inundación de un rebosadero circular. El líquido se introduce tangencialmente al rebosadero por una tubería, con lo cual se elimina la posible obturación de la boquilla.

Con este modelo se puede usar agua que tenga grandes cantidades de partículas sólidas. También protege y enfría la sección de entrada del Venturi.

Observando la figura 4.4.2.2, vemos que en la garganta del Venturi al hacer pasar el gas sucio aumenta la velocidad y disminuye la presión lo que provoca la ruptura de gotas que varían de tamaño de 5 a 15 micras.

$$v_{\text{polvo}} \gg v_{\text{gas}}$$

Esto ocasiona que la partícula alcanza a la gota y la arrastra debido a que es flujo paralelo; así, a la salida se coloca un ciclón para la colección de las partículas.

$v_{\text{gas}}$  varía de 200 a 300 ft/seg en la garganta

El tamaño de gota se calcula con la siguiente relación:

$$D_{\text{gota}} = \frac{16400}{v} + 1.4 (L')^{1.5} \quad \text{----- Eo. 4.4.2.1.}$$

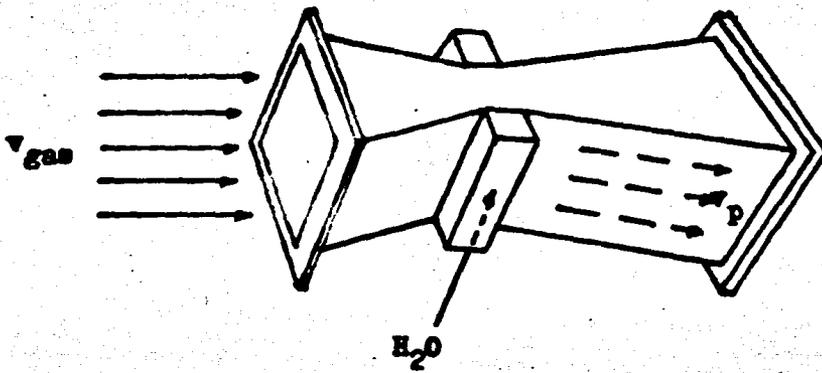


Figura 4.4.2.2.

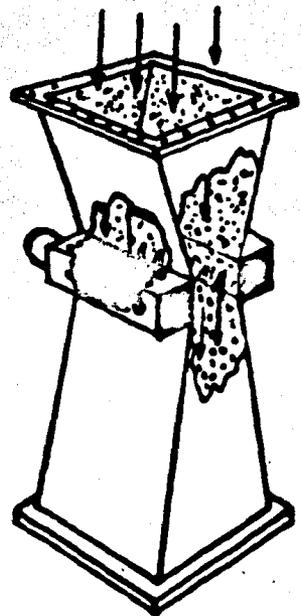


Figura 4.4.2.1. Levador Venturi vertical con flujo de gas hacia abajo

Donde:

$v_r$  = velocidad relativa de la partícula respecto al gas.

$$L' = \frac{\text{galones de agua}}{1000 \text{ ft}^3 \text{ de gas}}$$

El diámetro de corte o  $d_{50}$  (tamaño de partícula que recolecto con 50% de eficiencia) se calcula con la fórmula:

$$d_{50} = \exp(-1.56 - 1.46 \ln \frac{\Delta P}{5}) \quad \text{----- Ec. 4.4.2.2.}$$

Donde:

$\Delta P$  = (in  $H_2O$ ) manométrica

$\Delta P$  = 25 a 30 (in  $H_2O$ ) manométrica

$\Delta P$  se puede calcular de la siguiente forma:

$$\Delta P = 4 \times 10^{-5} v_g^2 (L') \quad \text{----- Ec. 4.4.2.3.}$$

Donde:

$v_g$  = velocidad del gas (ft/seg)

$4 \times 10^{-5}$  = factor de conversión para que  $\Delta P$  que de en unidades de (in  $H_2O$ ) manométrica.

#### 4.4.3. FILTROS DE TELA

##### PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Consiste en hacer circular una corriente de aire sucio a través de algún tipo de filtro, paño, tejido o fieltro, de tal manera que el gas pase entre los intersticios y las partículas queden atrapadas en la tela. A medida que se va filtrando el aire contaminado, empieza a crecer el número de partículas atrapadas y esto ocasiona que se cierren aún más las aberturas de la tela y se puedan coleccionar partículas más finas; de tal forma, que llega un momento en el cual se tiene que limpiar el filtro para poder seguirlo operando. Esto se hace frecuentemente

te sacudiendo las bolsas o lanzando chorros de aire a presión en sentido contrario al del gas que se hace pasar.

Hay algunos factores importantes a considerar en los filtros, a saber:

a) PERMEABILIDAD. La cual se define como: "La cantidad de aire atmosférico limpio en volumen por minuto que pasará por á rea unitaria de tela, con una pérdida de tiro de una unidad de columna de agua manométrica" (ASTM).

b) CAIDA DE PRESION. Esta presión es baja en un principio (tela limpia) y funciona el filtro con una eficiencia también-baja. Después de funcionar durante un período determinado de tiempo empieza a aumentar, tanto la presión como la eficiencia llegando el momento de limpiar la bolsa con el objeto de que -descienda nuevamente la presión a un límite razonable. Una vez usada una bolsa de filtros nunca llegará a tener otra vez la -caída de presión inicial y generalmente las bolsas de filtros-se limpian al llegar de 5.08 a 15.24 cm de columna de agua.

Los filtros de tela se encuentran en el mercado en una -gran variedad de tamaños y tipos que se pueden distinguir descubriendo los componentes más importantes:

#### CAJA O CUBIERTA

Puede ser una sola o dividida en compartimientos. El gas-puede entrar a través o se puede extraer. Hay por lo tanto, va-rias formas de designarlas: caja abierta de presión, caja ce-rrada de presión, caja cerrada de succión. La más empleada en-los colectores comerciales es la última porque permite traba- jar al ventilador con gas limpio.

#### MEDIO FILTRANTE

Los medios filtrantes se pueden arreglar de las formas si-guientes: envoltura, tubular redondo o en sig-sag.

Las telas de filtros se fabrican en una gran variedad de-texturas y materiales, tales como: tafeta, sarga o satín con -variaciones adicionales como el tipo de fibra: algodón, lana,-

fibras sintéticas y fibra de vidrio; tamaño de hebra, hebra sencilla o multifilamentosa; velluda o no; de hebra muy torcida o poco, etc.

Las bolsas afieltradas son más caras que las tejidas y las hay de lana y de fibras sintéticas. El algodón y la fibra de vidrio no sirven para hacer géneros afieltrados.

Las fibras también se escogen de acuerdo a su resistencia para varios factores como: temperatura, abrasión, aguante a corrientes ácidas, alcalinas, combustibilidad, etc.

Todos estos factores, además de valorar costos de instalación, de energía, de duración probable y sustitución se acumulan para la selección del medio filtrante en particular.

Los tipos básicos de filtros de tejido con bolsas en forma de tubo tienen las siguientes características:

a) TIPO BASICO DE CAMARA DE BOLSAS. Puede ser: intermitente, convencional, con limpieza de flujo invertido, limpieza con anillo de chorro a presión y limpieza con chorro intermitente a presión.

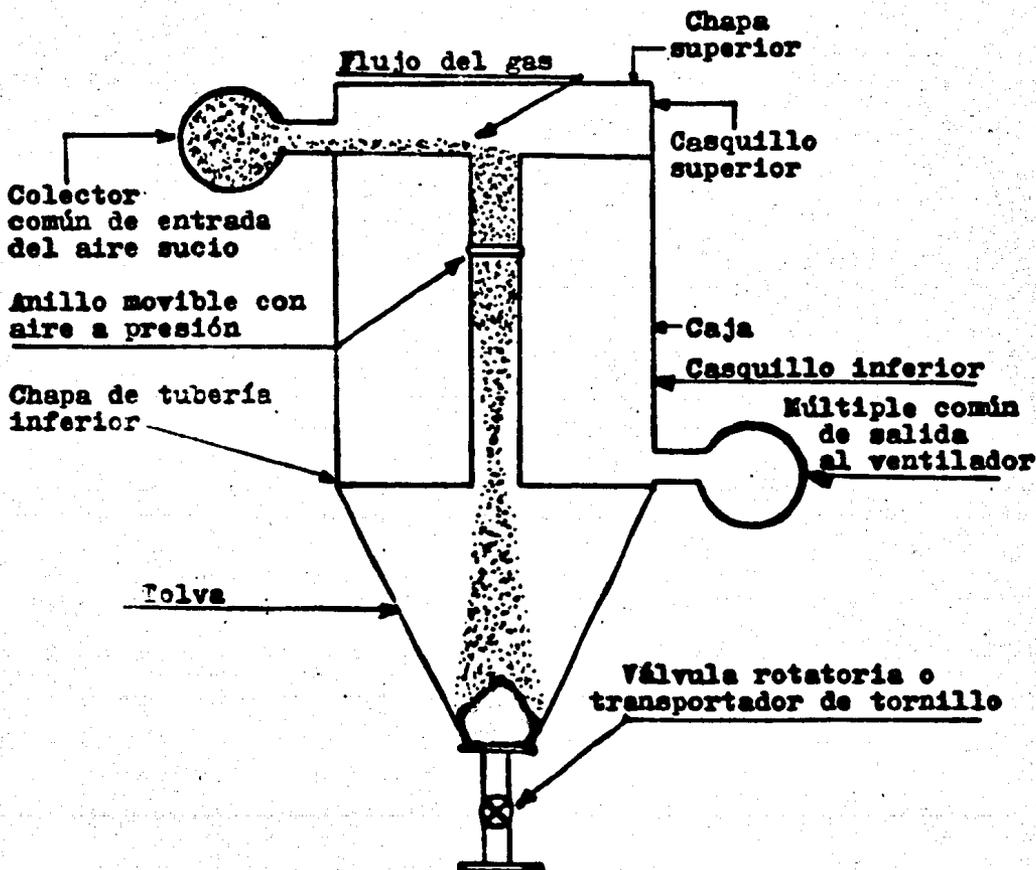
b) TIPO DE BOLSA. Es: tubo de tejido o tubo de fieltro.

c) LIMPIEZA EN LOS TUBOS. Hay varios métodos: agitación manual o con aplicación de energía; agitación automática, mecánica o neumática; anillo móvil con aire a presión; chorro intermitente a presión alta; plegamiento del tubo automáticamente por presión baja de flujo invertido.

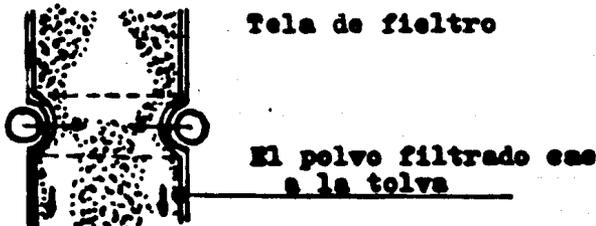
#### VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS DE BOLSAS

Una ventaja muy importante es su gran eficiencia a diferentes cargas, desde la máxima hasta el flujo nulo de gas. Algunos inconvenientes incluyen el gran tamaño, alto costo de mantenimiento y de costo de sustitución de la bolsa. Otros problemas incluyen la destrucción de las bolsas a temperaturas demasiado altas o la obturación del tejido debido a la humedad cuando funcionan por debajo del punto de rocío.

Las figuras 4.4.3.1 y 4.4.3.2 muestran dos tipos de filtros de bolsas con su ciclo de filtración y limpieza.



Ciclo de filtración y de limpieza



Corte transversal del anillo móvil con aire a presión

Figura 4.4.3.1. Cámara de bolsas con chorro de contracorriente en anillo móvil

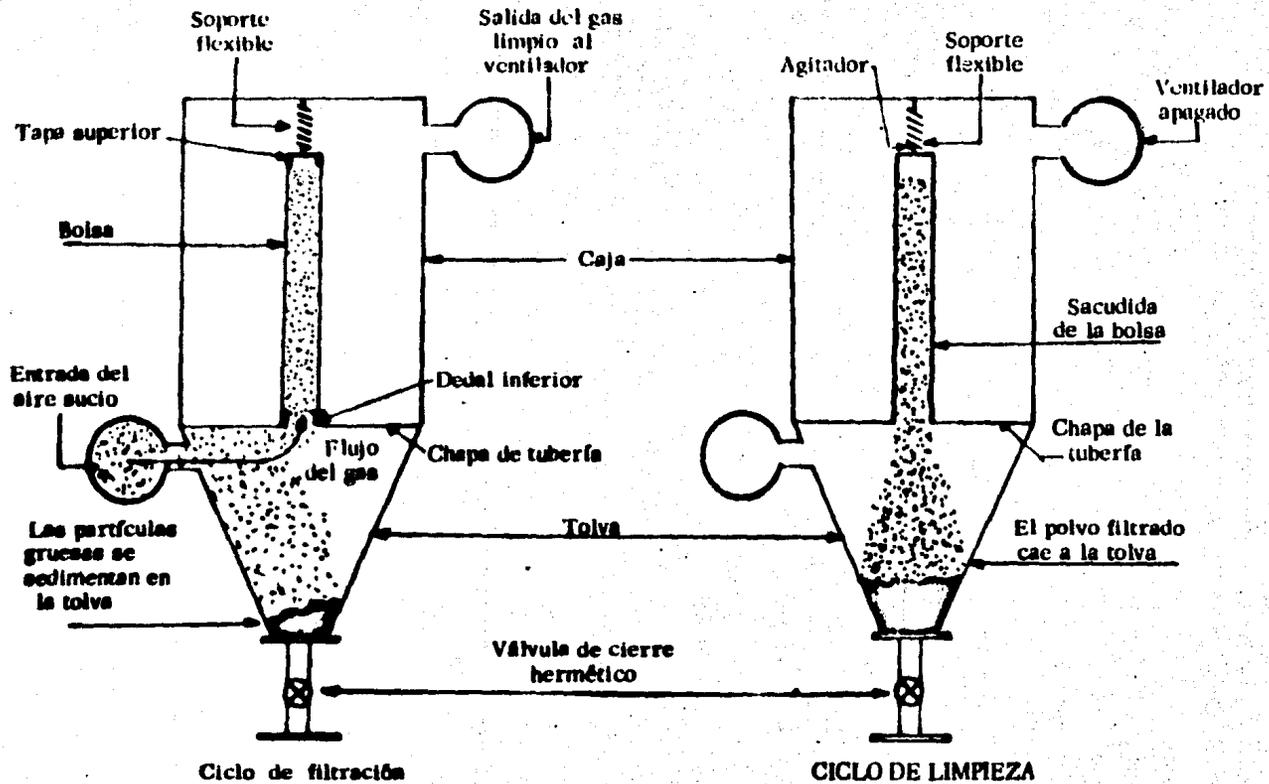


FIGURA No. 4.3.2. Cámara intermitente de filtros con limpieza por sacudida manual o automática

#### 4.4.4. PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

El camino tomado por una partícula dentro de un precipitador electrostático es debido a dos fuerzas: una correspondiente al campo eléctrico y la otra debida al flujo de gas, éste es el efecto básico del funcionamiento de un precipitador electrostático (ver figura 4.4.4.1).

Existen diversos tipos de precipitador:

- a) Precipitador tubular de paso simple.
- b) Precipitador de placa de paso simple.
- c) Precipitador de dos pasos (figura 4.4.4.2).

El modelo específico de un precipitador electrostático dependerá de los requerimientos que se tengan pero básicamente consiste de dos o más secciones conectadas en serie dentro de una carcasa común.

Dicha carcasa puede ser de acero, concreto, ebonita, etc. Las secciones están separadas unas de otras tanto eléctrica como mecánicamente. Cada sección consiste de los electrodos de descarga (con un alto voltaje) y los electrodos de colección conectados a tierra.

Las características del gas y el polvo, así como la concentración de éste último (masa por unidad de volumen), tendrán influencia sobre las condiciones eléctricas y determinarán la velocidad de migración de las partículas, dependiendo de esta velocidad y del volumen de gas, se podrá determinar la superficie total de colección del precipitador electrostático.

Las partes más importantes de un precipitador electrostático se presentan en la figura 4.4.4.3. El sistema de los electrodos de descarga, figura 4.4.4.4; el mecanismo de limpieza para los electrodos de colección en la figura 4.4.4.5; para cada sección, el sistema de descarga es soportado por cuatro aisladores, figura 4.4.4.6 y una de las muchas formas de ensamble o suspensión de los electrodos de colección, figura 4.4.4.7.

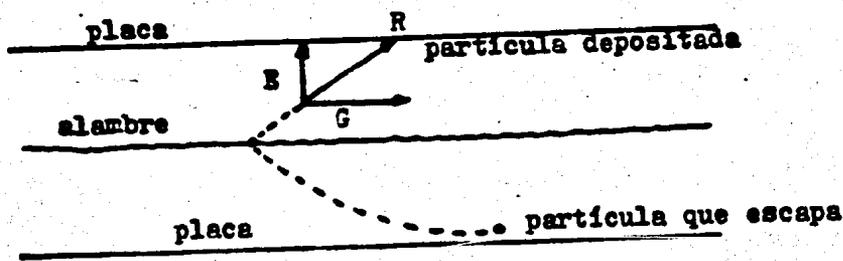


Figura 4.4.4.1

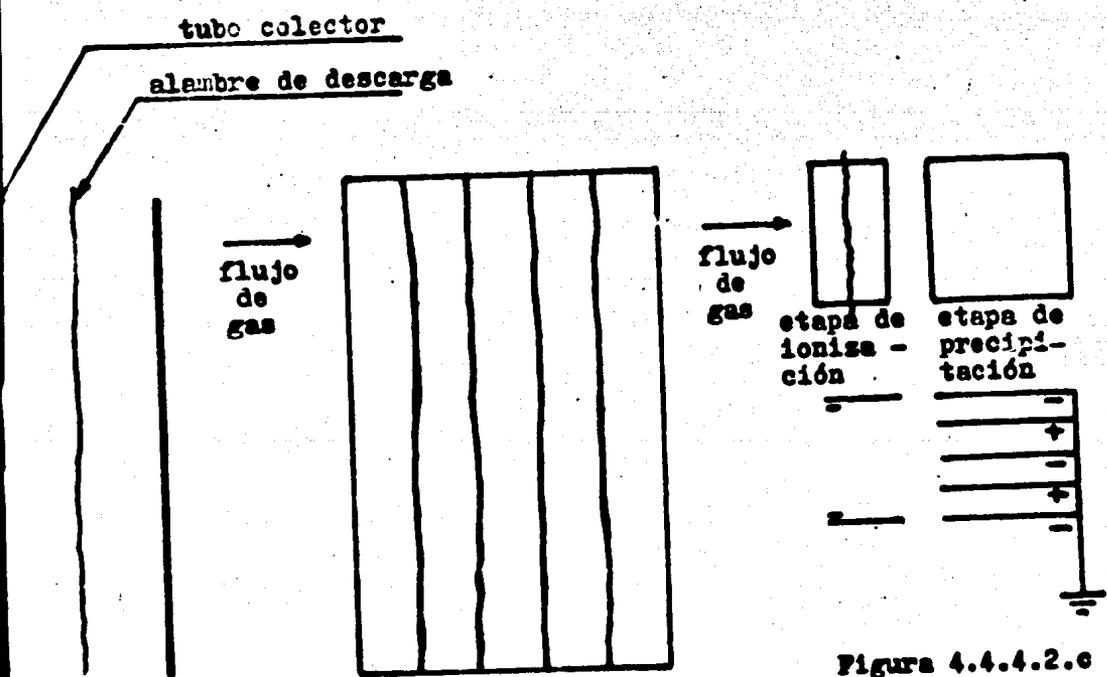


Figura 4.4.4.2.c

Figura 4.4.4.2.a

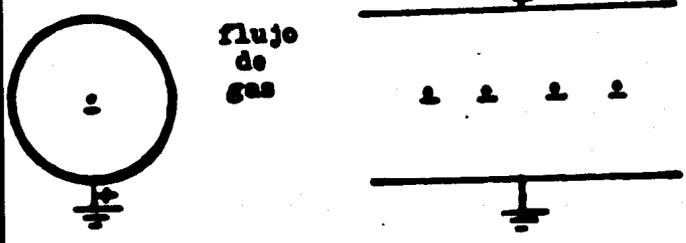


Figura 4.4.4.2.b

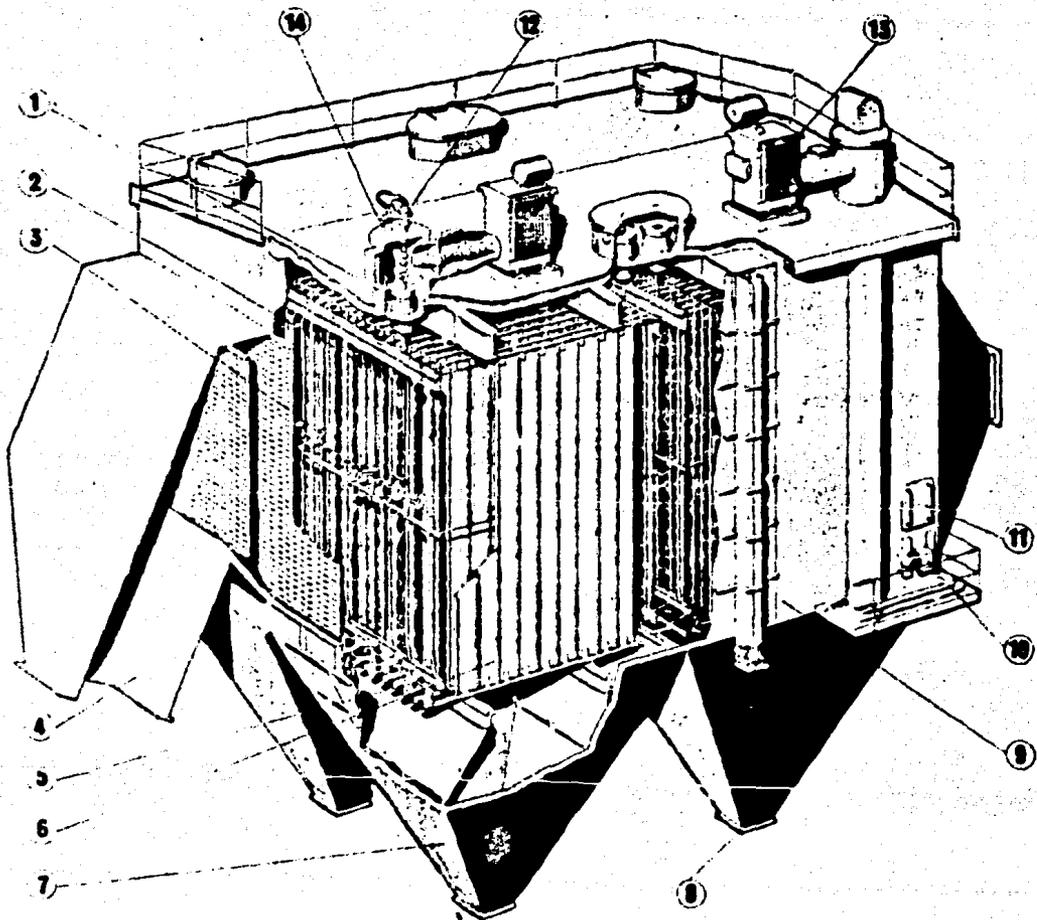


Figura 4.4.4.3

1. Aisladores
2. Sistema de descarga
3. Mecanismo de limpieza para el sistema de descarga
4. Sistema de distribución del gas de entrada
5. Mecanismo de limpieza para el sistema de colección
6. Electrodo colector
7. Tolva de polvos
8. Descarga de polvos
9. Aislamiento de lana mineral
10. Mecanismo que mueve al sistema de limpieza de los electro - dos colectores
11. Puerta de acceso
12. Mecanismo que mueve al sistema de limpieza de los electro - dos de descarga
13. Reguladores de voltaje
14. Cubreaisladores

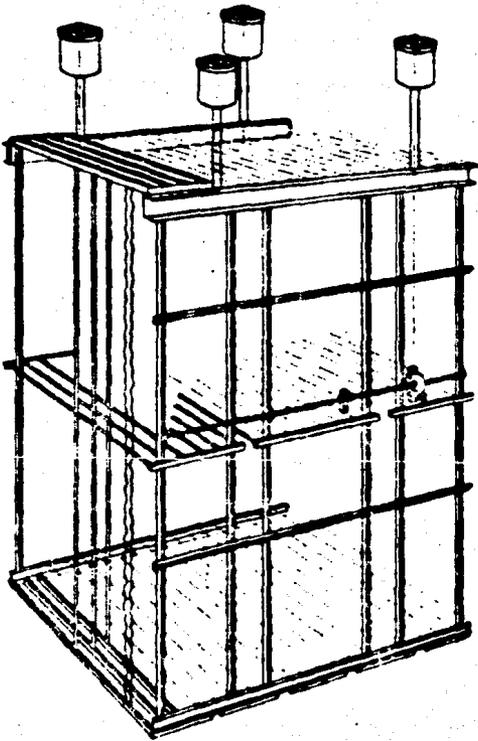
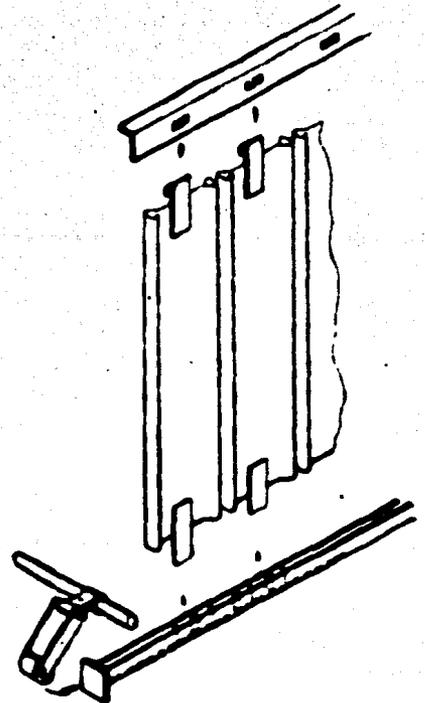


Figura 4.4.4.4

Figura 4.4.4.5



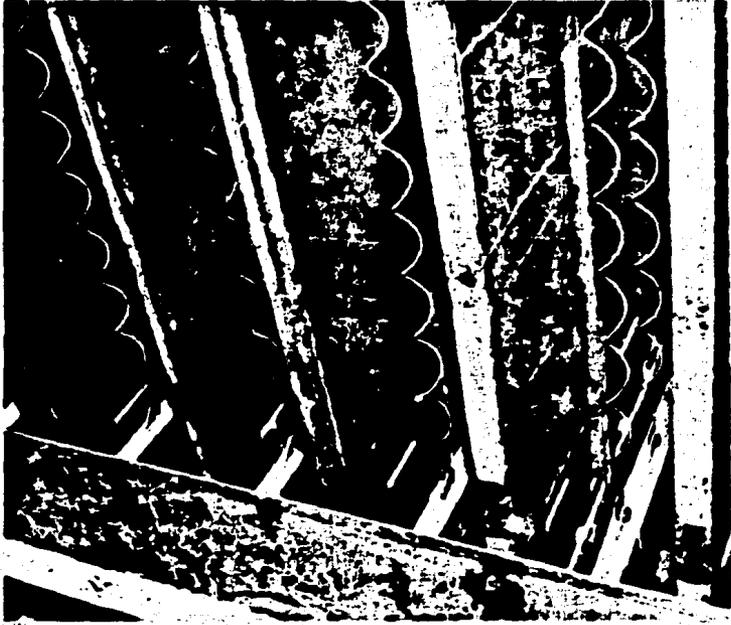


Figure 4.4.4.6

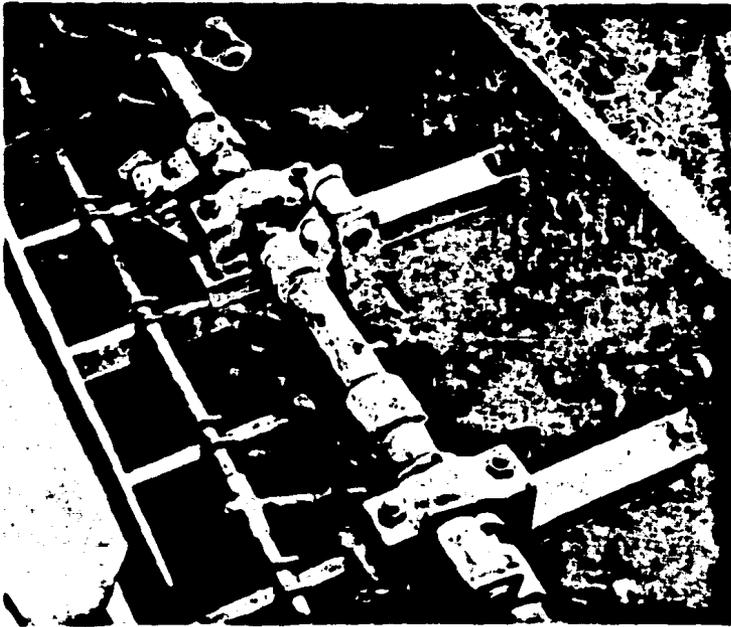


Figure 4.4.4.7

A fin de que resulte justificable el uso de un precipitador electrostático en la colección de humos y polvos, es necesario que se manejen elevados volúmenes de éstos; es decir, de aproximadamente  $90,000 \text{ m}^3$  en adelante; este volumen y el uso de un precipitador electrostático, dependerán de las características de los humos y polvos manejados principalmente.

Los factores que influyen en forma directa en el diseño de un precipitador electrostático son:

- a) TIPO DE POLVO. Este será generalmente conocido para una aplicación particular.
- b) RESISTIVIDAD. Bajo condiciones de operación.
- c) RANGO DEL TAMAÑO DE PARTICULA. El análisis de clasificación del tamaño de polvo.
- d) CONCENTRACION. La concentración del polvo expresada en  $\text{g}/\text{m}^3$ .
- e) COMPOSICION DEL GAS. Humedad; contenido y porcentaje de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , etc.
- f) TEMPERATURA DEL GAS. El rango operado o supuesto de temperatura de operación de los gases a ser tratados.
- g) VOLUMEN DEL GAS. El volumen por minuto y el rango de variación.

Algunas de las principales industrias que utilizan precipitadores electrostáticos son las siguientes:

- a) Industria del suministro eléctrico y planta industrial de calderas.
- b) Industria del cemento.
- c) Industria del hierro y el acero.
- d) Industria del aluminio.
- e) Industria de pulpa y papel.
- f) Industria química.
- g) Industria del gas.
- h) Industria del carbón.
- i) Aplicaciones metalúrgicas.
- j) Limpieza de aire atmosférico.

## CAPITULO V

### EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES DE PARTICULAS PARA UN HORNO DE ARCO ELECTRICO PROTOTIPO (10 TONELADAS)

En este capítulo analizaremos las diferentes alternativas de eficiencia y costo, así como de funcionamiento que nos ofrecen los equipos de control de emisiones más utilizados en este tipo de problemas.

Los datos del horno de arco eléctrico son los siguientes:

CAPACIDAD NOMINAL: 10 ton.

Nº. DE HORAS DE FUNCIONAMIENTO: 2 HORAS.

VOLUMEN EMITIDO DE GASES Y POLVOS: 10,800 m<sup>3</sup>/hr.

TEMPERATURA DE LOS GASES DE SALIDA: 950 °C.

CONCENTRACION: 2.25 g/m<sup>3</sup>

Pasemos ahora a ver las características de operación de los diferentes equipos de control de emisiones tratados.

#### 5.1. CICLON

Dado que el ciclón puede operar a la temperatura de los gases a la salida del horno no se colocará ningún sistema de enfriamiento de los gases.

Las propiedades de los gases emitidos son:

Densidad de la partícula:  $\rho_p = 2.3 \text{ g/cm}^3$  (143.5 lb/ft<sup>3</sup>)

Densidad del gas:  $\rho_g = 0.0182 \text{ lb/ft}^3$

Viscosidad del gas:  $\mu_g = 3.232 \times 10^{-5} \text{ lb/ft}^3\text{-seg.}$

Para un ciclón, tenemos los siguientes datos:

$B_c = 0.5 \text{ m}$  (1.6405 ft)

Núm. de vueltas: 8 (Ne)

Se recuerda que la nomenclatura del ciclón fue dada en el capítulo anterior.

Como:

$D_c = B_c/0.25$  y  $H_c = 0.5 D_c$ , entonces:

$H_c = 0.5 (B_c/0.25) = 3.281 \text{ ft.}$

Si el área del ducto de entrada al ciclón es  $A_d$ , entonces:

$A_d = B_c H_c$  y como  $Q = U_i A_d$ , tenemos que:

$U_i = Q/(B_c H_c) = 19.68 \text{ ft/seg.}$

Consecuentemente:

$L_c = 13.124 \text{ ft}$

$Z_c = 13.124 \text{ ft}$

$S_c = 0.28 \text{ ft}$

$J = 1.64 \text{ ft}$

Aplicando ahora la ecuación 4.4.1.1, encontramos la caída de presión  $\Delta P$ :

$\Delta P = 0.0141 \text{ lb/plg}^2.$

Aplicando la ecuación 4.4.1.2, obtenemos el valor del tamaño de corte  $D_{pc}$ :

$D_{pc} = 12.47 \text{ micras.}$

Variando en forma decreciente el ancho de entrada de la boca del ciclón y transformando unidades, obtenemos la Tabla 5.1.1.

Tabla 5.1.1. Valores de los parámetros del ciclón									
$B_c$	$D_c$	$H_c$	$D_e$	$L_c$	$S_c$	$J$	$Z_c$	$D_{pc}$	$\Delta P$
m	m	m	m	m	m	m	m	$\mu$	cmca
0.5	2.0	1.0	1.0	4.0	0.25	0.5	4.0	17.70	0.34
0.4	1.6	0.8	0.8	3.2	0.2	0.4	3.2	12.61	0.85
0.3	1.2	0.6	0.6	2.4	0.15	0.3	2.4	8.31	2.68
0.2	0.8	0.4	0.4	1.6	0.1	0.2	1.6	4.47	13.6
0.17	0.7	0.35	0.35	1.4	0.09	0.17	1.4	3.66	23.2
0.15	0.6	0.3	0.3	1.2	0.08	0.15	1.2	2.90	80.4
0.1	0.4	0.2	0.2	0.8	0.05	0.1	0.8	1.58	186

Si consideramos un  $D_p = 5$  micras (difícilmente se fabrican ciclones que puedan coleccionar partículas de menor diámetro) para un ciclón convencional con un ancho de entrada de:  $B_c =$

0.5  $\mu$  se tendrá que:  $D_p/D_{pc} = 5 \text{ micras}/17.7 \text{ micras} = 0.282$  correspondiente a una eficiencia de 7.5% (ver figura 5.1.1.). Si aumentamos en forma gradual el  $D_p$ , veremos que para lograr al menos una eficiencia de 90% en este tipo de ciclón, dicho  $D_p$  debería de ser de 50.1 micras, caso que no se presenta en el tamaño de partícula emitido por un horno de arco eléctrico.

Si reducimos el tamaño del ciclón con el fin de que sea más eficiente para un mismo tamaño de partícula (5 micras), se estará logrando sí, que sea más eficiente, pero las caídas de presión aumentarán considerablemente, lo que haría necesario el uso de potentes ventiladores (de materiales muy especiales debido a la temperatura de los gases), que elevaría demasiado el costo en la instalación del ciclón.

Por otro lado, consideremos que las partículas emitidas por un horno de arco eléctrico son fumos y el diámetro de éstos es de 1.5 micras como promedio. Así que, partículas de estas dimensiones en la práctica es imposible que las atrape un ciclón.

Existen alternativas mediante las cuales es factible aumentar la eficiencia sin que se incremente, o al menos un poco la caída de presión, por ejemplo: alargando el cono del ciclón, dándole un acabado superficial interno excelente, aumentando la velocidad del gas de la entrada del ciclón etc.

Por lo tanto podemos concluir, que el ciclón es un colector aplicable en procesos en los que el  $D_p$  sea apreciablemente grande, para así lograr altas eficiencias y consecuentemente una buena colección de polvos.

Para el ejemplo en cuestión, vemos que el ciclón resulta inaplicable ya que el tamaño de partícula a colectar, puede ser separado por los otros tipos de colectores operando además con altas eficiencias.

En la figura 5.1.2 podemos observar el comportamiento de la eficiencia del ciclón en relación al cambio en la presión.

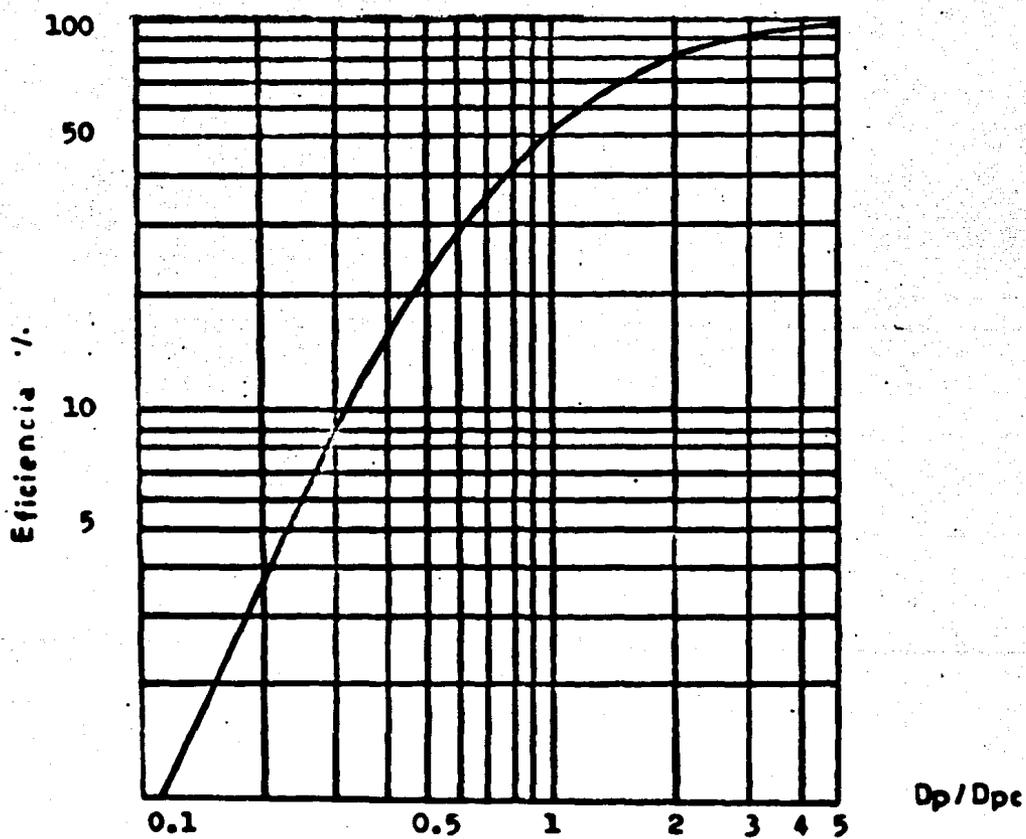
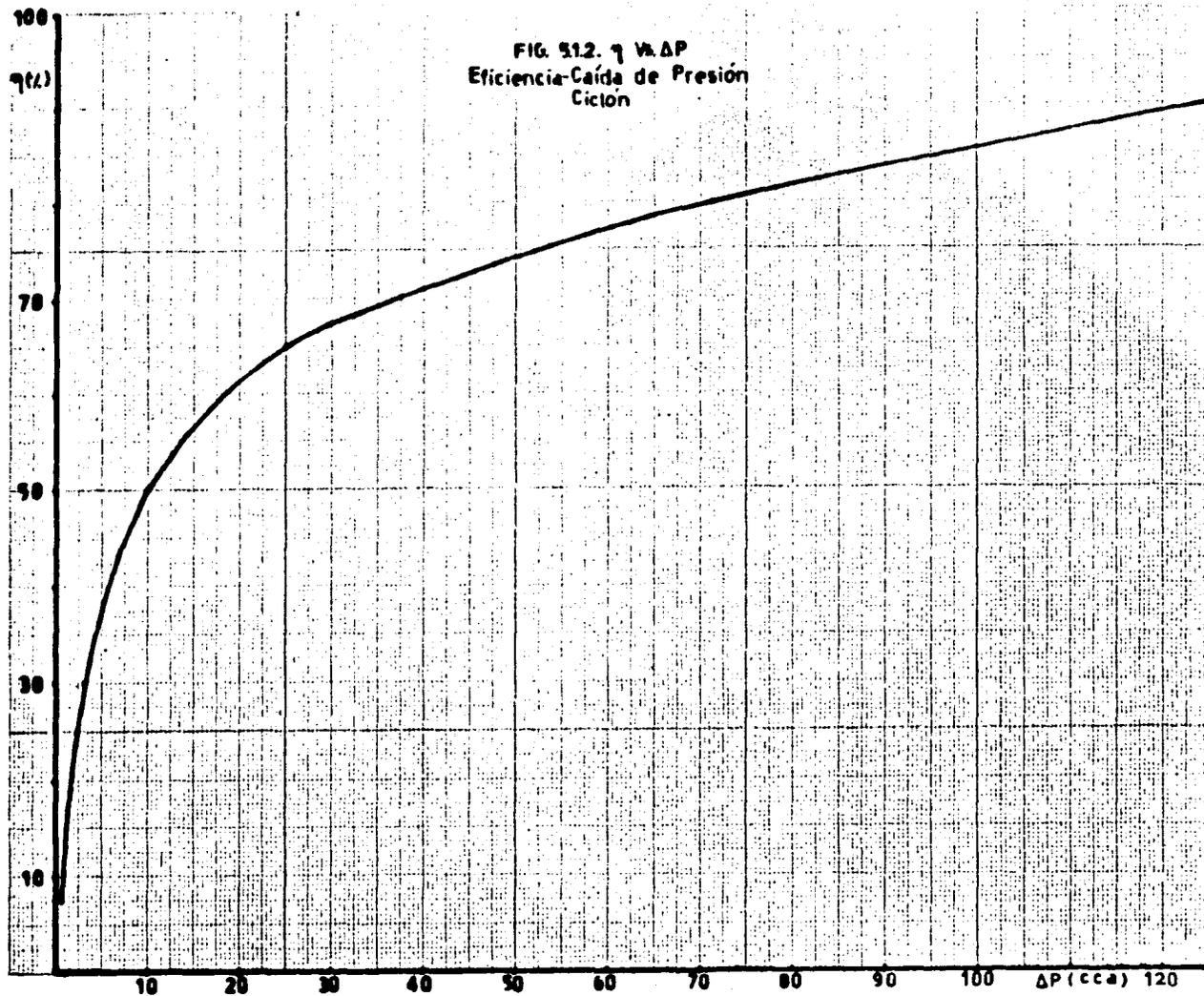
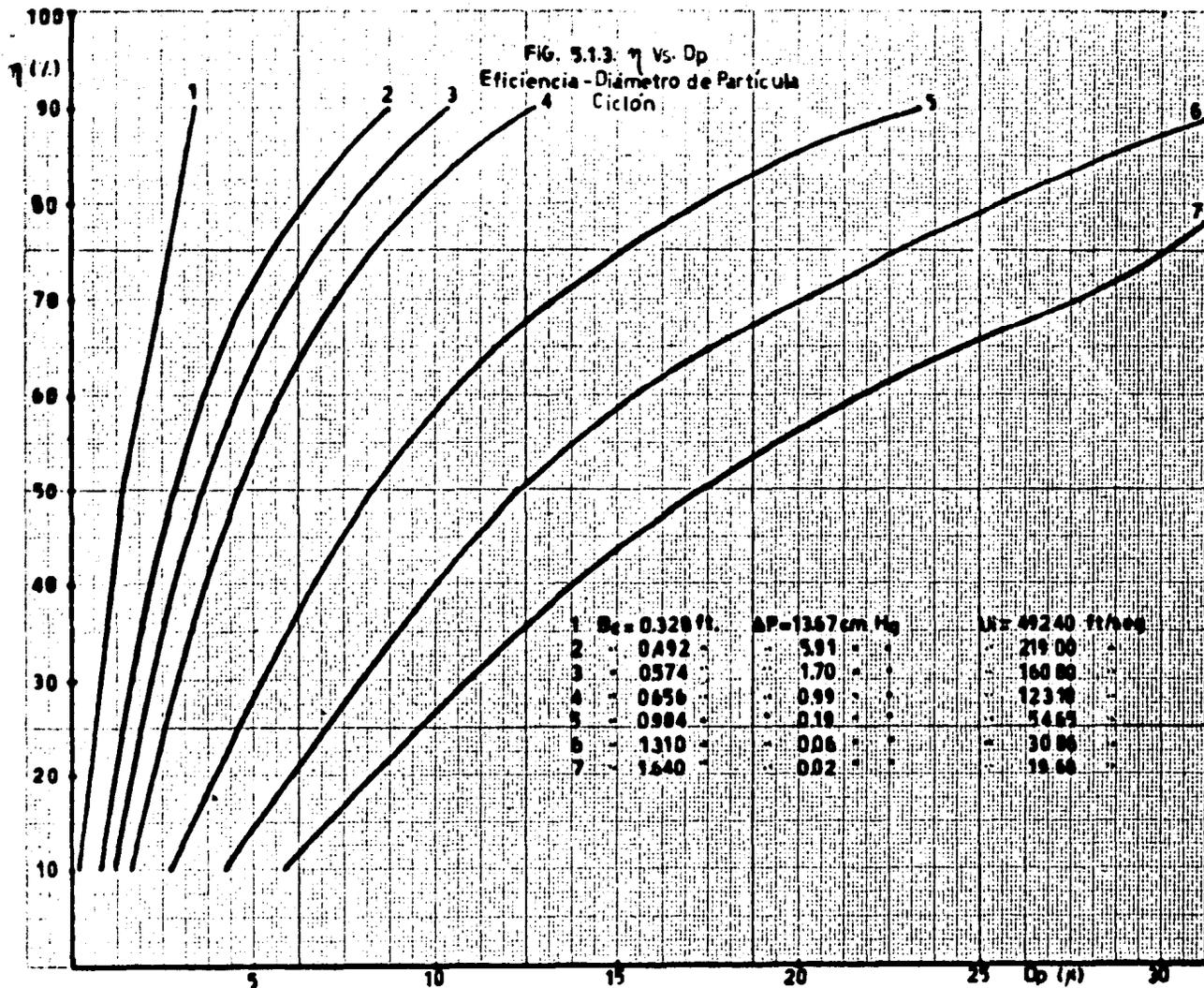


Fig. 5.1.1. Relación de tamaño de partícula  $D_p/D_{pc}$

FIG. 51.2.  $\eta$  vs.  $\Delta P$   
Eficiencia-Caida de Presión  
Ciclón





Para obtener el valor del área total del ciclón haremos referencia a la figura 4.4.1.1, donde:

$$A_1 = (2\pi D_c/2)(L_c)$$

$$A_2 = \pi g(D_c/2 + J/2)$$

$$A_3 = 2\pi(D_c/2)R_c$$

$$A_4 = 2(H_c B_c)$$

$$A_5 = 2\pi(J/2)(J/2)$$

$$A_6 = (\pi/4)(D_c^2 - D_e^2)$$

Donde:  $g$  = generatriz del cono.

Para los diferentes anchos de entrada y sustituyendo las fórmulas anteriores, obtenemos la Tabla 5.1.2

m <sup>2</sup>	Bc = 0.5 m	Bc = 0.4 m	Bc = 0.3 m	Bc = 0.2 m	Bc = 0.1 m
A <sub>1</sub>	25.13	16.085	9.048	4.021	1.005
A <sub>2</sub>	14.49	10.24	5.754	2.56	0.64
A <sub>3</sub>	4.712	3.14	1.696	0.754	0.471
A <sub>4</sub>	1.0	0.64	0.36	0.16	0.04
A <sub>5</sub>	0.393	0.25	1.272	0.063	0.016
A <sub>6</sub>	2.36	1.508	0.85	0.38	0.094

Para cada caso se considera un 20% adicional por desperdicio de corte. Por lo tanto, el área total para cada ancho de entrada será el mostrado en la Tabla 5.1.3.

Bc (m)	Area total (m <sup>2</sup> )
0.5	57.702
0.4	32.24
0.3	22.82
0.2	9.528
0.1	2.720

Estos valores serán utilizados para el análisis económico.

## 5.2. LAVADOR VENTURI

Utilizando la ecuación 4.4.2.1, tenemos que:

$V_T$  = velocidad en la garganta del venturi - velocidad del gas

$$v_g = 8.5 \text{ m/seg (dato)}$$

$$v_y = 94 \text{ m/seg,}$$

$$v_T = (94 - 8.5) \text{ m/seg} = 85.5 \text{ m/seg} = 281.24 \text{ ft/seg}$$

$$L' = 7 \text{ gpm/1,000 pcm}$$

$$= L/Q = 7 \text{ gpm/1,000 pcm} \times 6,406.95 \text{ pcm} = 45 \text{ gpm (a condiciones de temperatura del ducto)}$$

Sustituyendo todos estos valores en la ecuación 4.4.2.1:

$$D_{\text{gota}} = 16,400/281.24 + 1.4 (45)^{1.5} = 480.93 \text{ micras}$$

Por otro lado, se necesita determinar AP (caída de presión máxima del agua en las espumas). La ecuación 4.4.2.3, relaciona la caída de presión contra el gasto de agua.

$$AP = 4 \times 10^{-5} (309.2)^2 (45) \\ = 172.08 \text{ (in H}_2\text{O) man.} = 6.2 \text{ (lb/in}^2\text{)}$$

#### CARACTERÍSTICAS DEL TUBO VENTURI

$$\text{Sección de entrada} = 0.2 \text{ m}^2$$

$$\text{Lado de entrada} = 44.7 \text{ cm}$$

$$\text{Sección estrangulada} = 0.018 \text{ m}^2$$

$$\text{Lado estrangulado} = 13.41 \text{ cm}$$

$$\text{Altura total} = 1.6 \text{ m}$$

Este dimensionamiento corresponde a las características de un horno de arco eléctrico de 10 toneladas de capacidad nominal.

#### CURVAS EFICIENCIA Vs. DIAMETRO DE PARTICULA

a) A partir de la ecuación 4.4.2.1, variando el gasto de agua ( $L'$ ), se puede determinar el diámetro de gota para cada caso. Ver Tabla 5.2.1.

Tabla 5.2.1. Determinación del diámetro de gota

$L'$ (gpm)	Dgota ( $\mu$ )
45	480.93
30	288.35
15	139.64
7.5	87.06
3.0	65.58

b) A cada  $L'$  le corresponde un diámetro de gota. Se varía la eficiencia desde 90% hasta 10%, y en base a la curva de eficiencia vs. diámetro de gota de la figura 5.2.1 (Air Pollution Joe O. Ledbetter, Marcel Dekker Inc. N.Y., 1974, página 190) - se determinan los valores de eficiencia vs. diámetro de partícula para cada diámetro de gota y gasto de agua  $L'$ , para de ahí establecer las curvas.

La Tabla 5.2.2, nos indica los valores de eficiencia contra diámetro de partícula y, estos valores están graficados en la figura 5.2.2.

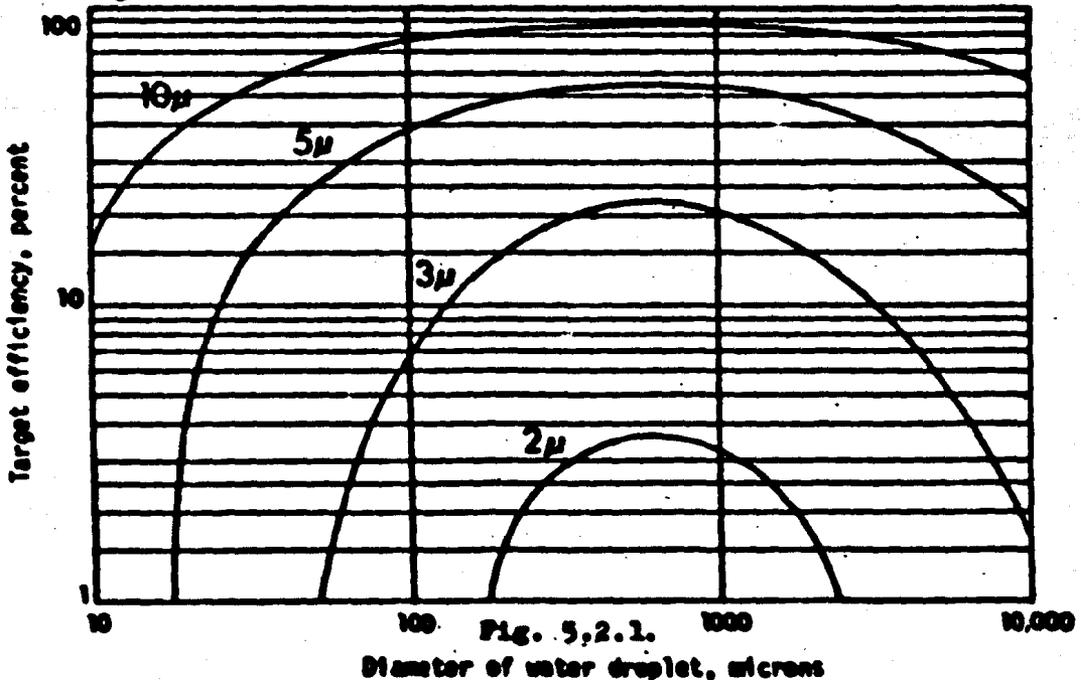
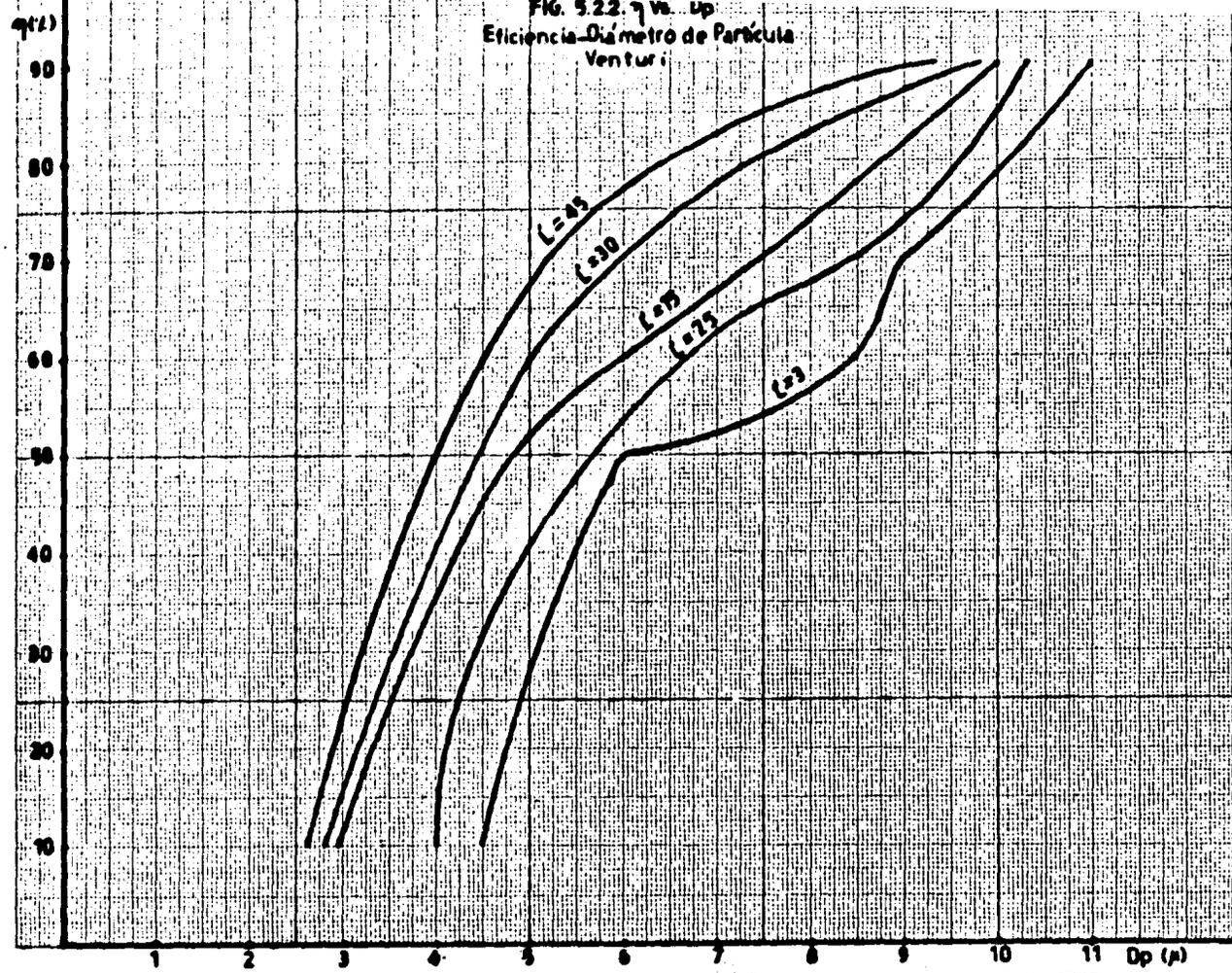


Fig. 5.22.  $\eta$  vs.  $D_p$   
Eficiencia-Diámetro de Partícula  
Venturi



Curva 1		Curva 2		Curva 3		Curva 4		Curva 5	
$\eta$ (%)	Dp ( $\mu$ )								
90	9.3	90	9.8	90	10.0	90	10.3	90	11.0
70	5.2	70	6.0	70	7.5	70	8.0	70	9.0
60	4.5	60	5.0	60	6.0	60	6.7	60	8.5
50	4.0	50	4.0	50	4.5	50	5.2	50	6.0
10	2.5	10	2.8	10	3.0	10	4.0	10	4.5

**CURVA EFICIENCIA Vs. CAIDA DE PRESION ( $\Delta P$ )**

a) En base a la ecuación 4.4.2.3, variando el gasto de agua  $L'$ , se puede determinar la caída de presión ( $\Delta P$ ) para cada caso. Ver Tabla 5.2.3.

$L'$ (gpm)	$\Delta P$ (ca $H_2O$ )
45.0	439.08
30.0	291.39
15.0	145.69
7.5	72.85
3.0	29.13

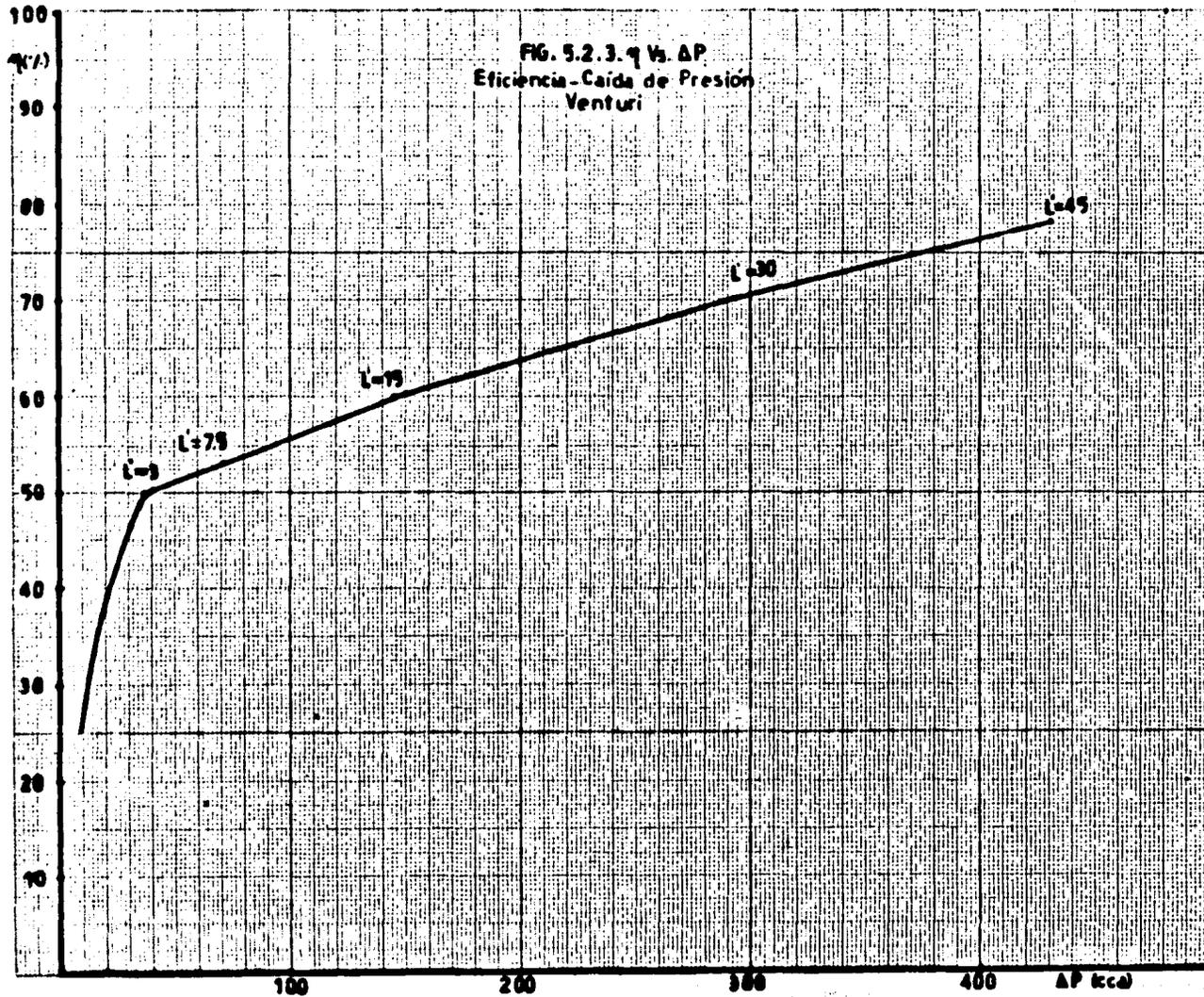
b) De la curva de eficiencia vs. diámetro de partícula (- fig. 5.2.2) , tomando una partícula de 6 micras de diámetro como la de mayor ocurrencia y para los diversos valores de gasto de agua  $L'$ , se obtienen sus correspondientes eficiencias.

c) Para cada gasto de agua  $L'$ , corresponde un valor de caída de presión  $\Delta P$ , así la eficiencia es la misma para los dec-valores, obteniéndose con este método la curva de la figura - 5.2.3.

**5.3. FILTROS DE TELA**

En este problema utilizaremos tela de filtro de orlón con las siguientes especificaciones:

FIG. 5.2.3.  $q$  Vs.  $\Delta P$   
Eficiencia-Caída de Presión  
Venturi



Diámetro de fibra:  $D = 28 \mu = 28 \times 10^{-6} \text{ m.}$

Temperatura máxima de operación:  $135 \text{ }^\circ\text{C.}$

Densidad de empaque:  $c = 0.20.$

La temperatura de los gases a la salida del horno es de  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  y nosotros necesitamos bajarla a  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por lo que, utilizaremos un intercambiador de calor. Por lo tanto, si mantenemos la presión constante a la entrada y salida de dicho intercambiador de calor, el volumen de gases será ahora de:

$$P_1 V_1 = nRT_1 \quad \text{y} \quad P_2 V_2 = nRT_2$$

Igualando  $P_1$  a  $P_2$  tenemos:

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \longrightarrow V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_1 = \frac{135 + 273}{950 + 273} (3) = 1 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

#### CURVAS EFICIENCIA Vs. DIAMETRO DE PARTICULA

Utilizaremos el siguiente método para encontrar la gráfica eficiencia vs. diámetro de partícula.

Las ecuaciones empleadas son:

$$a = \frac{18\mu}{d^2 c} \quad \text{-----} \quad \text{Ec. 5.3.1.}$$

$$\Omega = \frac{V_g}{aD} \quad \text{-----} \quad \text{Ec. 5.3.2.}$$

$$f = \frac{d/D + 2\sqrt{c}\Omega X(1 - f)(1 - e^{-(1/2\sqrt{c}\Omega X)})}{1 - 2\sqrt{c}\Omega X(1 - e^{-(1/2\sqrt{c}\Omega X)})} \quad \text{---} \quad \text{Ec. 5.3.3.}$$

$$f = \frac{1 + f}{2Ku} (2\ln(1 + f) + c - 1 + \frac{2 - c}{2(1 + f^2)} - \frac{c(1 + f)^2}{2}) \quad \text{Ec. 5.3.4.}$$

$$\Lambda = \frac{Q}{V_g(1 - c)} \quad \text{-----} \quad \text{Ec. 5.3.5.}$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido ( $\mu = 2.25 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$ )

$C$  = Factor de corrección de Cunningham. Este valor depende del tamaño de la partícula y es significativo sólo en partículas menores de 1 micra.

$\rho_p$  = Densidad de la partícula (5,290 Kg/m<sup>3</sup>).

$d$  = diámetro de la partícula (m).

$V$  = Velocidad dentro de filtro (m/seg).

$\eta$  = Eficiencia .

$K_u$  = Factor Kuwabara.

$A$  = Area de tela (m<sup>2</sup>).

$D$ ,  $c$  y  $Q$  ya fueron definidos anteriormente.

$a$ ,  $\Omega$ ,  $\beta$ ,  $X$  son valores involucrados en las ecuaciones.

#### PROCEDIMIENTO:

a) Se determina la cantidad  $a$ .

b) Se obtiene el valor  $\Omega$  .

c) Empleando la ecuación 5.3.3 se valora  $\beta$ , quedando como variables  $X$  y  $\eta$  .

d) Se empieza un proceso iterativo (el cual converge rápidamente) fijando arbitrariamente  $\beta$ , con este valor y  $c$  entramos a la Tabla 5.3.1 ó figura 5.3.1 (Air Pollution Control Theory, Crawford. Mc. Graw Hill, 1976, págs. 430 y 432), o de la ecuación 5.3.4. y obtenemos  $\eta$ . Ahora, de la figura 5.3.2 (idem-pág. 431) encontramos  $X$ . Sustituyendo estos valores en la ecuación 5.3.3 se determina el nuevo valor de  $\beta$  el cual se compara con el anterior. Si varía mucho se realiza una nueva iteración hasta que la diferencia entre el valor último de  $\beta$  y el anterior sea mínimo.

Utilizando este procedimiento y variando el diámetro de la partícula obtenemos las curvas para diferentes velocidades dentro de filtro; y, por lo tanto, diferentes áreas. Ver Tabla 5.3.2.

Para este tipo de problemas se recomienda usar una velocidad dentro de filtro de 0.01016 m/seg, hasta 0.0762 m/seg. Una velocidad más alta ocasionaría que el filtro se tapara demasiado rápido (ya que las caídas de presión se incrementarían mucho); y, por lo tanto, su limpieza sería más continua y la tela se acabaría con mayor rapidez.

$c$	0.001	0.002	0.005	0.0075	0.01	0.02
0.01	0.0000367	0.000042	0.0000519	0.0000579	0.0000629	0.0000794
0.02	0.0001458	0.000167	0.0002063	0.0002299	0.0002500	0.0003155
0.05	0.0008938	0.001024	0.001265	0.001409	0.001532	0.001933
0.10	0.003466	0.003971	0.004904	0.005464	0.005941	0.007493
0.15	0.007573	0.008675	0.01071	0.01194	0.01298	0.01636
0.20	0.01309	0.01499	0.01851	0.02063	0.02242	0.02826
0.25	0.01991	0.02281	0.02816	0.03137	0.03410	0.04296
0.30	0.02795	0.03201	0.03951	0.04402	0.04784	0.06024
0.40	0.04733	0.05421	0.06690	0.07451	0.08097	0.1019
0.50	0.07071	0.08097	0.09991	0.1113	0.1209	0.1520
0.60	0.09764	0.1118	0.1379	0.1536	0.1668	0.2095
0.70	0.1278	0.1463	0.1804	0.2008	0.2181	0.2738
0.80	0.1608	0.1841	0.2271	0.2527	0.2744	0.3441
0.90	0.1966	0.2250	0.2774	0.3087	0.3351	0.4199
1.00	0.2348	0.2688	0.3312	0.3685	0.3999	0.5006

$c$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.01	0.0001183	0.0001791	0.000246	0.000324	0.000419	0.000535
0.02	0.0004701	0.0007112	0.000976	0.001286	0.001661	0.002122
0.05	0.002879	0.004350	0.005964	0.007846	0.01011	0.01289
0.10	0.01115	0.01681	0.02299	0.03017	0.03877	0.04927
0.15	0.02431	0.03658	0.04992	0.06533	0.08370	0.1060
0.20	0.04194	0.06299	0.08575	0.1119	0.1429	0.1803
0.25	0.06368	0.09543	0.1296	0.1687	0.2147	0.2698
0.30	0.08920	0.1339	0.1807	0.2345	0.2975	0.3724
0.40	0.1505	0.2240	0.3019	0.3894	0.4905	0.6087
0.50	0.2239	0.3318	0.4446	0.5699	0.7123	0.8757
0.60	0.3079	0.4541	0.6050	0.7702	0.9546	1.162
0.70	0.4013	0.5887	0.7798	0.9954	1.210	1.456
0.80	0.5029	0.7340	0.9661	1.211	1.474	1.751
0.90	0.6120	0.8852	1.1614	1.444	1.799	2.037
1.00	0.7276	1.0501	1.364	1.681	2.000	2.307

Tabla 5.3.1.  $\bar{y}$  como función de  $\rho$  y  $c$ .

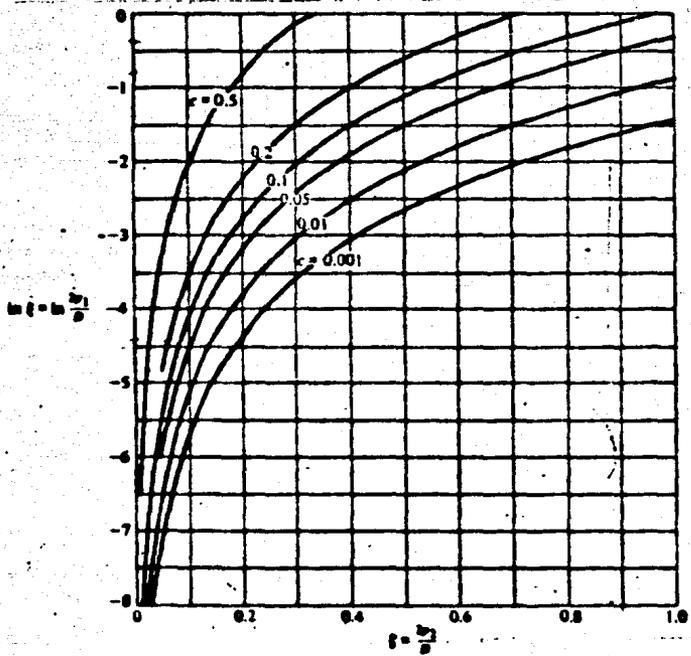


Figura 5.3.1. Gráfica de la ecuación 5.3.4.

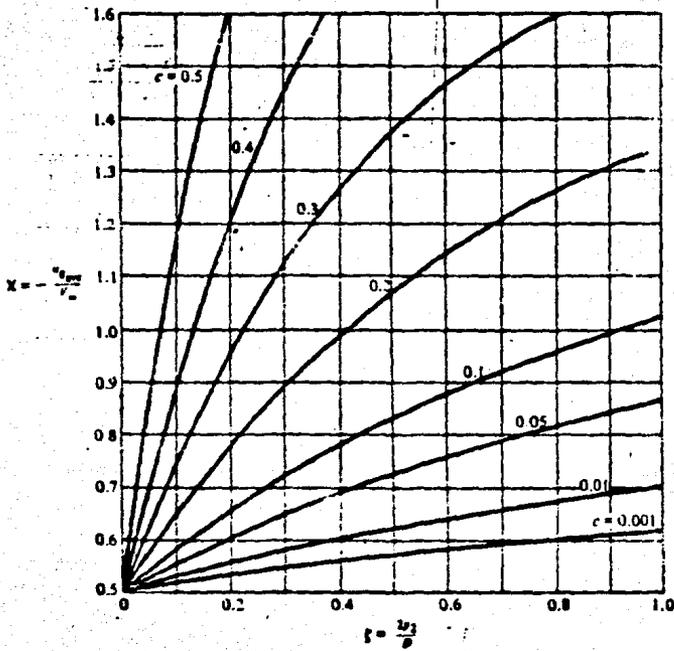


Figura 5.3.2.  $X$  en función de  $c$  y  $f$ .

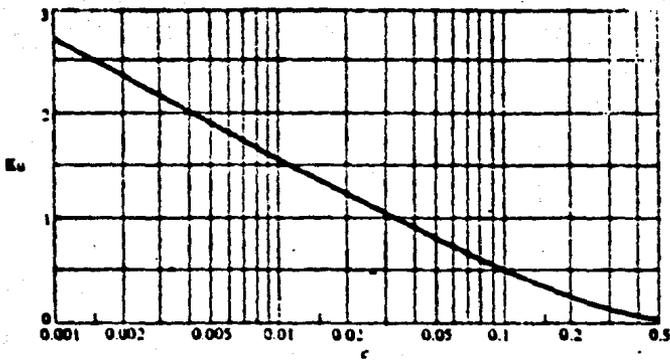


Figura 5.3.4. Parámetro Kuwabara  $Ku$  como una función de  $c$

Tabla 5.3.2. Valores de eficiencia en función del diámetro de partícula.

Curva 1		Curva 2		Curva 3		Curva 4	
$V_0 = 0.1524 \text{ m/s}$ $A_1 = 8.20 \text{ m}^2$		$V_0 = 0.1016 \text{ m/s}$ $A_2 = 12.30 \text{ m}^2$		$V_0 = 0.0508 \text{ m/s}$ $A_3 = 24.60 \text{ m}^2$		$V_0 = 0.01016 \text{ m/s}$ $A_4 = 123.03 \text{ m}^2$	
$\frac{V_0}{d}$	$\eta$	$\frac{V_0}{d}$	$\eta$	$\frac{V_0}{d}$	$\eta$	$\frac{V_0}{d}$	$\eta$
0.1	0.0004	0.1	0.0002	0.1	0.00005	1	0.0046
1.0	0.0515	1.0	0.0208	1.0	0.01654	3	0.0510
2.0	0.2038	3.0	0.4107	3.0	0.1687	5	0.1793
3.0	0.5699	4.0	0.6820	5.0	0.6809	8	0.5699
4.0	0.9912	5.0	0.9010	6.0	0.9212	10	0.9520

En la figura 5.3.3 se encuentra graficada la Tabla 5.3.2.

**CURVAS EFICIENCIA Vs. CAIDA DE PRESION**

Analizaremos la caída de presión en el filtro primeramente estando limpio y posteriormente ya en operación.

Utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta P_A D^2}{QL} = \frac{16 c}{Ku} \quad \text{----- Ec. 5.3.6.}$$

Donde:

Q = Gasto utilizado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

L = Espesor del material (m)

Los demás factores ya fueron definidos.

Tomaremos un valor medio de partícula de 4 micras para nuestro análisis y un espesor de tela de 8 mm (0.008 m).

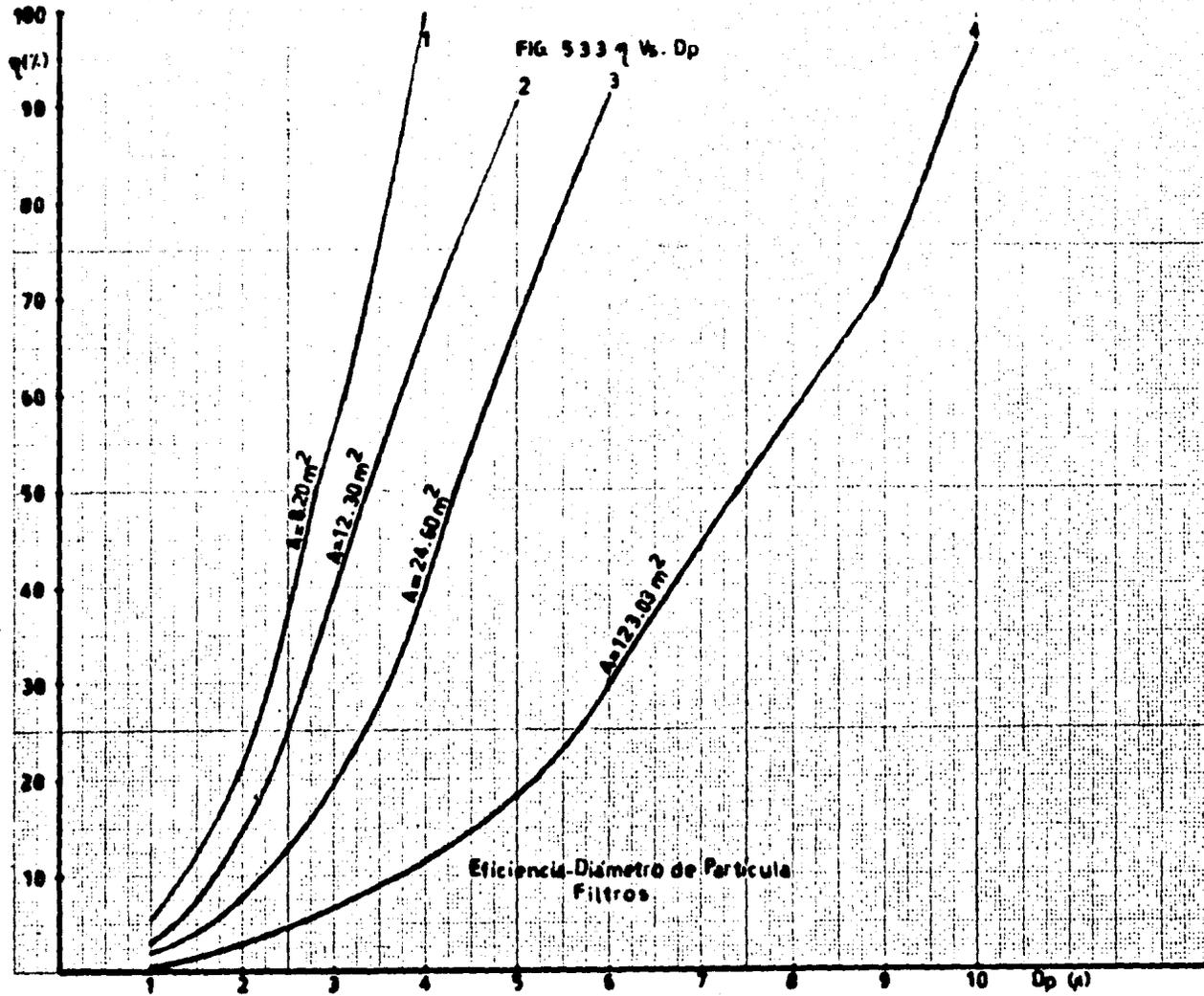
Sea:

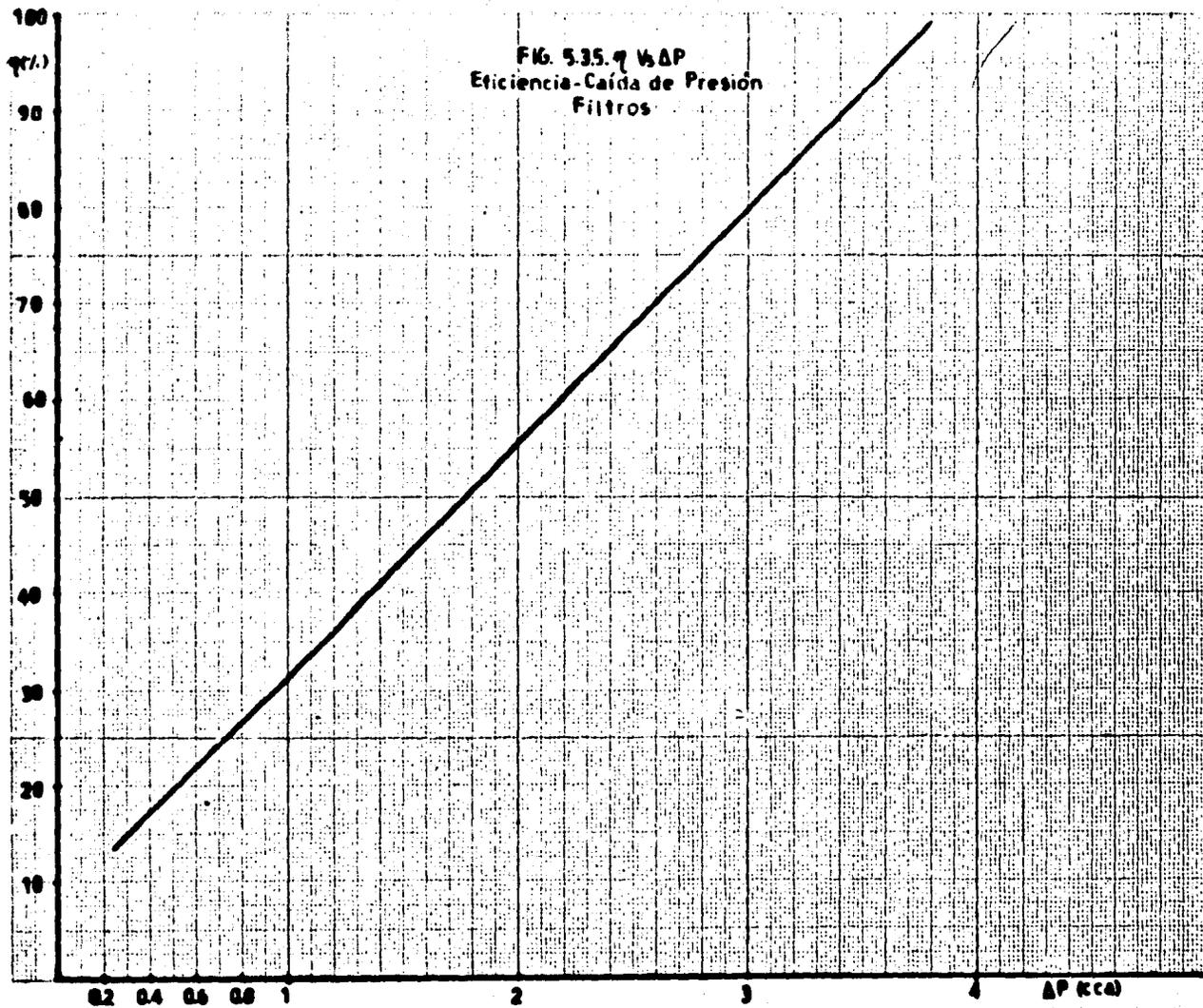
$$\frac{16 c}{Ku} = \frac{16 (0.2)}{0.24} = 13.3$$

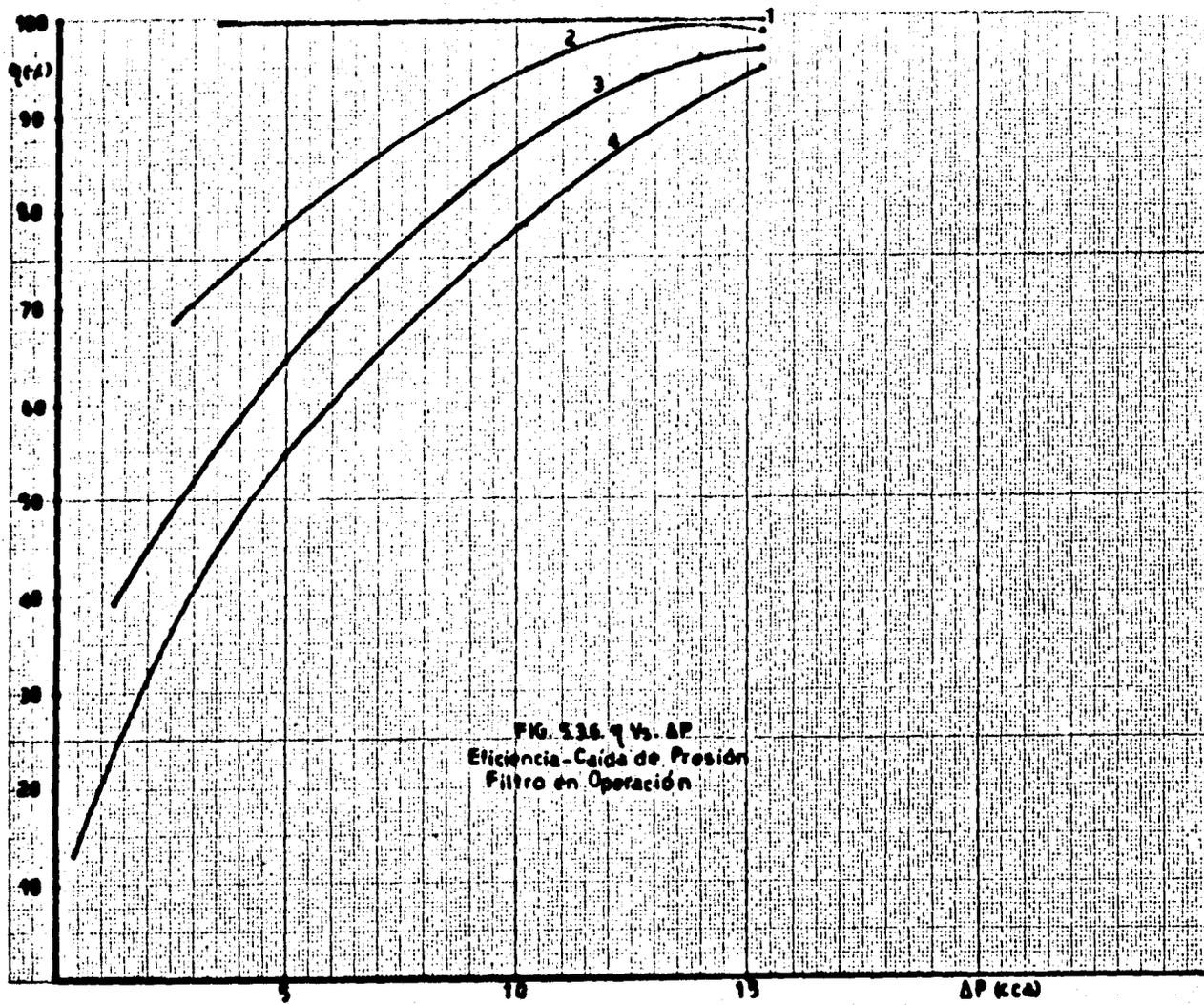
El factor Kuwabara se obtiene de la figura 5.3.4. en función de la densidad de empaque c.

Sustituyendo el valor anterior en la fórmula 5.3.6. y despejando  $\Delta P$ , tenemos:

$$\Delta P = \frac{13.3 A V_0 L}{D^2} \quad \text{----- Ec. 5.3.6'.$$







Donde:

$$V_0 = (1 - c) V_L$$

Tomando en cuenta que la eficiencia está en función directa con la velocidad dentro de filtro, podemos sustituir valores en la ecuación 5.3.6', relacionando la eficiencia con la caída de presión. Así, obtenemos la Tabla 5.3.3.

Tabla 5.3.3. Eficiencia en función de la caída de presión, para filtro nuevo.

$\eta$ (%)	AP (cm H <sub>2</sub> O)
13.59	0.2515
39.10	1.2649
68.20	2.5298
99.12	3.7846

La Tabla 5.3.3 se muestra en la figura 5.3.5.

La gráfica de eficiencia vs. caída de presión para un filtro en operación se establece en la práctica. Es decir, con el filtro ya instalado. Sin embargo, las curvas siguen la forma indicada en la figura 5.3.6. (Dust Control and Air Cleaning, - Dorman, Pergamon Press, 1974, pág. 361).

#### PERIODOS DE TIEMPO PARA LA LIMPIEZA

Realizaremos ahora un estudio comparativo de los diferentes periodos de tiempo que hay que esperar antes de limpiar el filtro.

Las caídas de presión encontradas anteriormente se refieren al filtro nuevo (completamente limpio). Sin embargo, si usamos el filtro y lo limpiamos, la caída de presión ya no es la misma que la inicial, sino que aumenta; de tal manera, que ya nunca volveremos a tener la presión primera.

La caída de presión en un filtro debido a la tela es casi despreciable, puesto que representa menos del 10% de la caída de presión total.

Este estudio se basa comparando las diferentes áreas de las bolsas sin importar el material de que están hechas, ya -

que para obtener esto es necesario utilizar datos reales sacados del filtro ya instalado (los cuales no los tenemos).

De aquí podemos observar, que para realizar el diseño de bolsas de filtros tenemos que recurrir con mucha frecuencia a datos experimentales.

La fórmula que utilizaremos será:

$$t = \frac{A_f}{K_2 Q C_{mv}} \left( \frac{\Delta P A_f}{Q} - K_1 \right) \quad \text{Ec. 5.3.7.}$$

Donde:

t = Tiempo en que la limpieza debe ocurrir (seg).

$A_f$  = Área de filtrado ( $m^2$ ).

$\Delta P$  = Caída de presión en la cual debe ocurrir la limpieza.

Se recomienda limpiar cuando esta presión esté entre 15.24 y 20.32 cm de  $H_2O$ . ( $N/m^2$ ).

$C_{mv}$  = Concentración ( $g/m^3$ ).

$K_1$  y  $K_2$  son constantes que se valúan en la práctica y para cada caso en particular. Dependen de muchos factores, entre ellos el tipo de tela utilizado y su valor oscila entre:  $12,000 < K_1 < 120,000 \text{ N-s}/m^3$   
 $10,000 < K_2 < 130,000 \text{ s}^{-1}$

Como nosotros no sabemos estos valores, supondremos unos para conocer de una manera comparativa la variación que hay entre los tiempos con respecto a las diferentes áreas utilizadas.

Sea  $K_1 = 12,000 \text{ N-s}/m^3$  y  $K_2 = 20,000 \text{ s}^{-1}$ .

Y, la caída de presión a la cual haremos la limpieza igual a 15.24 cm  $H_2O$  ( $1,494.6 \text{ N}/m^2$ ).

Sustituimos estos valores en la ecuación 5.3.7, para las diferentes áreas utilizadas y obtenemos la Tabla 5.3.4.

Tabla 5.3.4. Tiempos de limpieza en función del área.

$A_f$ ( $m^2$ )	t (seg)
8.20	46.59
12.30	1744.84 (29.08 min)
24.60	13543.93 (3.762 hrs)
123.03	469921.66 (130.533 hrs)

Así pues, este es el ciclo de limpieza de un filtro de -  
bolsas de un solo compartimiento. Pero, en nuestro caso necesi-  
taremos de más compartimientos. Por lo que ahora veremos qué -  
número de bolsas necesitamos para cada caso y de qué tamaño -  
son.

#### DIMENSIONAMIENTO DE LAS BOLSAS DE TELA

El área de filtrado está dada por la ecuación:

$$A_f = n \pi D L \quad \text{-----} \quad \text{Ec. 5.3.7.}$$

Donde:

n = número de bolsas.

D = Diámetro de la bolsa (cilíndrica).

L = Longitud de la bolsa.

Generalmente, las bolsas se fabrican en las siguientes me-  
didas: diámetros de 5 a 12 pulgadas (12.5 a 30 cm). Longitudes  
de 6 a 12 pies (2 a 6 m). Para una operación adecuada la longi-  
tud con respecto al diámetro no debe exceder la proporción 20-  
a 1.

En nuestro caso utilizaremos bolsas de tamaño estándar -  
fabricadas por "Johnson March", las cuales tienen una área de-  
12.5 pies<sup>2</sup> (1.16129 m<sup>2</sup>).

El número de las mismas para cada caso lo podemos encon-  
trar despejando n de la ecuación 5.3.7, obteniéndose los sigui-  
entes resultados:

Para una área de	8.20 m <sup>2</sup>	-----	8	bolsas
" " " "	12.30 m <sup>2</sup>	-----	11	"
" " " "	24.60 m <sup>2</sup>	-----	22	"
" " " "	123.03 m <sup>2</sup>	-----	106	"

Este será el número de bolsas que siempre tendrán que es-  
tar trabajando para poder limpiar el aire contaminado. Así que,  
se deberá contar además con un número extra de bolsas para que  
sustituyan a las que por motivo de limpieza dejen de funcionar.

El ciclo de limpieza para un filtro de bolsas de n compar-  
timientos se realiza de una manera similar que para uno solo -

(visto anteriormente) aunque más complicada. En este caso no todas las bolsas se echan a funcionar al mismo tiempo sino que se pone a trabajar la primera y después de un cierto tiempo se echa a andar otra y así sucesivamente hasta que trabajen todas. Esto se hace con el fin de que no se saturen todas las bolsas al mismo tiempo y se tenga que parar el equipo. Sino que en el instante en que se sature la primera bolsa y se tenga que parar para su limpieza, inmediatamente se pone a trabajar una de las bolsas extras con las que se cuenta y de esta forma siempre se mantiene constante el área de filtrado.

De cualquier forma, en la práctica este ciclo de limpieza se ve sometido a las necesidades del trabajo en cuestión.

#### 5.4. PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

Debido a que la temperatura de los gases es muy elevada, se requiere enfriarlos hasta un rango que resulte operable en un precipitador electrostático. Utilizando el mismo procedimiento que para los filtros de tela, a una temperatura de 150°C, el volumen de gases y polvos será:  $Q = 3,736 \text{ m}^3/\text{hr}$ .

Para el precipitador electrostático tenemos que:

$$E = 1 - R_e/R_o \quad \text{-----} \quad \text{Ec. 5.4.1.}$$

$$E = 1 - e^{-wA/Q} \quad \text{-----} \quad \text{Ec. 5.4.2.}$$

Donde:

E = Eficiencia.

R<sub>o</sub> = Concentración de polvos a la entrada del precipitador a la temperatura y presión actual ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

R<sub>e</sub> = Concentración de polvos a la salida del precipitador a la temperatura y presión actual ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

e = Base de los logaritmos naturales.

Q = Flujo volumétrico de los gases a la entrada del precipitador a la temperatura y presión actual ( $Q = 1.0376 \text{ m}^3/\text{seg}$ ).

A = Area de colección.

Generalmente el precipitador electrostático opera con eficiencias comprendidas entre 99 y 99.9%, por lo tanto si:

$R_o = 2.25 \text{ g/m}^3$  y como  $E = 1 - R_e/R_o$ , entonces:

$R_e = R_o (1 - E)$ .

Sustituyendo valores obtenemos la variación de concentración de polvos a la salida del precipitador al variar la eficiencia de éste. Dichos valores se muestran en la Tabla 5.4.1.

Tabla 5.4.1. Concentración de polvos en función de la eficiencia.

E (%)	$R_o$ ( $\text{g/m}^3$ )	$R_e$ ( $\text{g/m}^3$ )
99.0	2.25	0.0225
99.1	"	0.0203
99.2	"	0.0180
99.3	"	0.0160
99.4	"	0.0140
99.5	"	0.0113
99.6	"	0.0090
99.7	"	0.0070
99.8	"	0.0050
99.9	"	0.0023

Según las características del polvo, la velocidad de migración es aproximadamente :  $w = 0.11 \text{ m/seg}$ , y como:

$A = Q/w \ln 1/1 - E$ . Considerando diferentes eficiencias de diseño, tenemos los siguientes resultados: Tabla 5.4.2.

Tabla 5.4.2. Valores de área en función de eficiencia.

E (%)	$A_2$ ( $\text{m}^2$ )	E (%)	$A_2$ ( $\text{m}^2$ )
10.0	0.994	99.1	44.430
20.0	2.105	99.2	45.540
30.0	3.263	99.3	46.800
40.0	4.820	99.4	48.260
50.0	6.540	99.5	49.980
60.0	8.643	99.6	52.10
70.0	11.150	99.7	54.80
80.0	15.180	99.8	58.62
90.0	21.71	99.9	65.20
99.0	43.44		

### CURVA EFICIENCIA Vs. DIAMETRO DE PARTICULA

La curva de eficiencia vs. diámetro de partícula sigue la forma indicada en la figura 5.4.1. (Air Pollution Control, parte I. W. Strauss Wiley, Interscience, 1971, pág. 270).

### CURVA EFICIENCIA Vs. CAIDA DE PRESION

La caída de presión en un precipitador electrostático es muy pequeña; mucho menor que en otros equipos usados para la colección de polvos y partículas. Generalmente, ésta se encuentra en el orden de 0.762 cm de H<sub>2</sub>O y rara vez excede de 2.54 cm de H<sub>2</sub>O, excepto en experimentos de alta velocidad.

En el caso de un precipitador electrostático para limpieza de aire ambiental, la caída de presión varía de 0.00762 cm de H<sub>2</sub>O para una velocidad de gases de 1.829 m/s, a 0.01016 cm de H<sub>2</sub>O para una velocidad de gases de 2.49 m/s.

Comercialmente, independientemente del modelo específico de un precipitador electrostático, algunos fabricantes suelen tomar para efectos de diseño, una caída de presión constante de 1.5 cm de H<sub>2</sub>O, según lo muestra la figura 5.4.2.

## 5.6. ANALISIS ECONOMICO DE LOS DIFERENTES EQUIPOS DE CONTROL

### CICLON

Considerando una lámina calibre 7, se tiene un peso de 37 Kg/m<sup>2</sup>. Por otro lado, tenemos que: Precio de venta = (peso de lámina)(Área total por equipo)(36). Donde 36, es un factor que incluye precio de lámina, mano de obra, energía consumida, etc.

El precio de venta para cada ciclón según su ancho de entrada, lo podemos observar en la Tabla 5.6.1.

No obstante que el ciclón para este problema es inaplicable, como ya lo dijimos con anterioridad, si nos basamos en las restricciones principales que son: caída de presión y tamaño de partícula, el "más recomendable" sería aquél cuya caída de presión sea de 2.68 cm de H<sub>2</sub>O y si consideramos un diámetro -

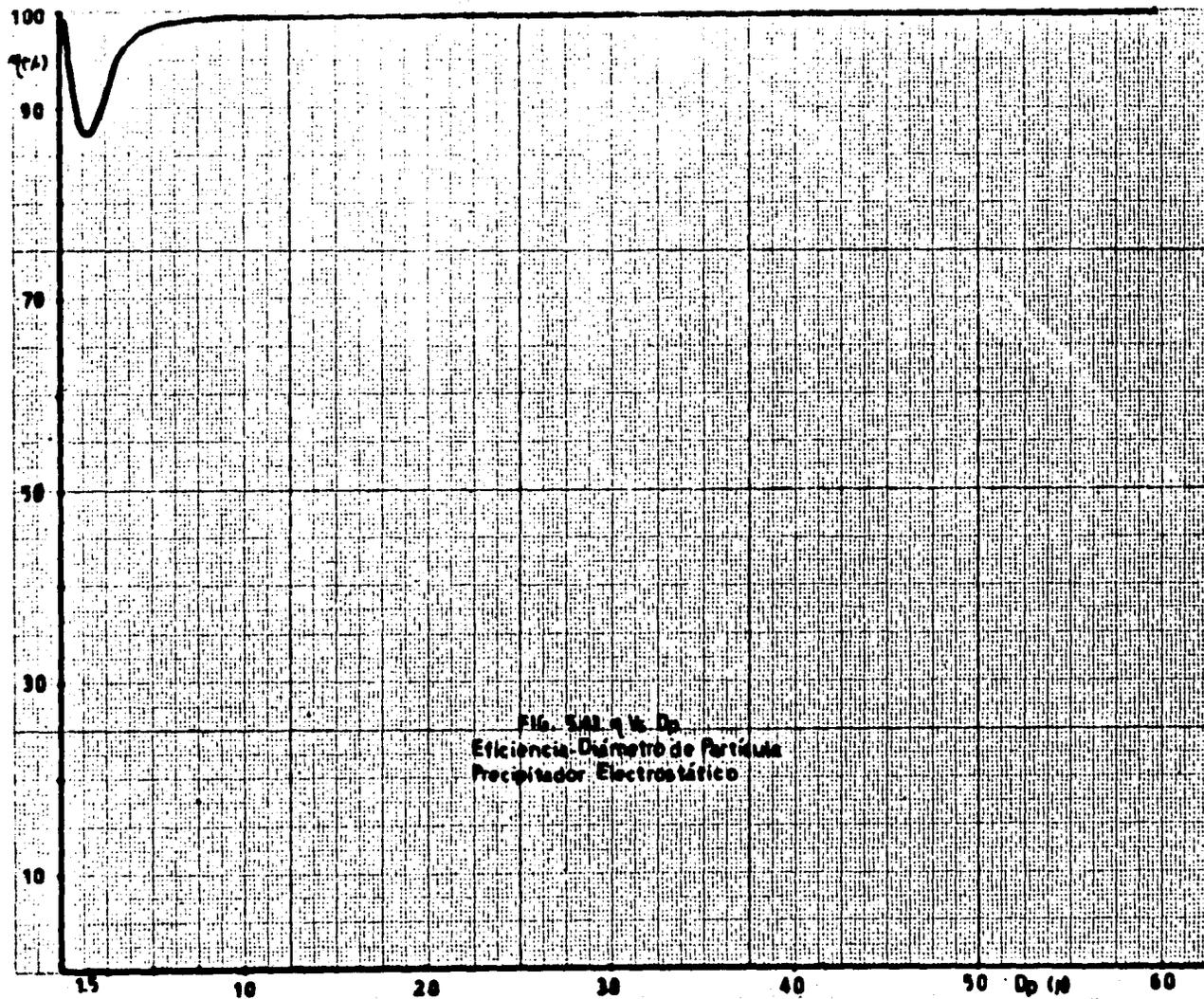
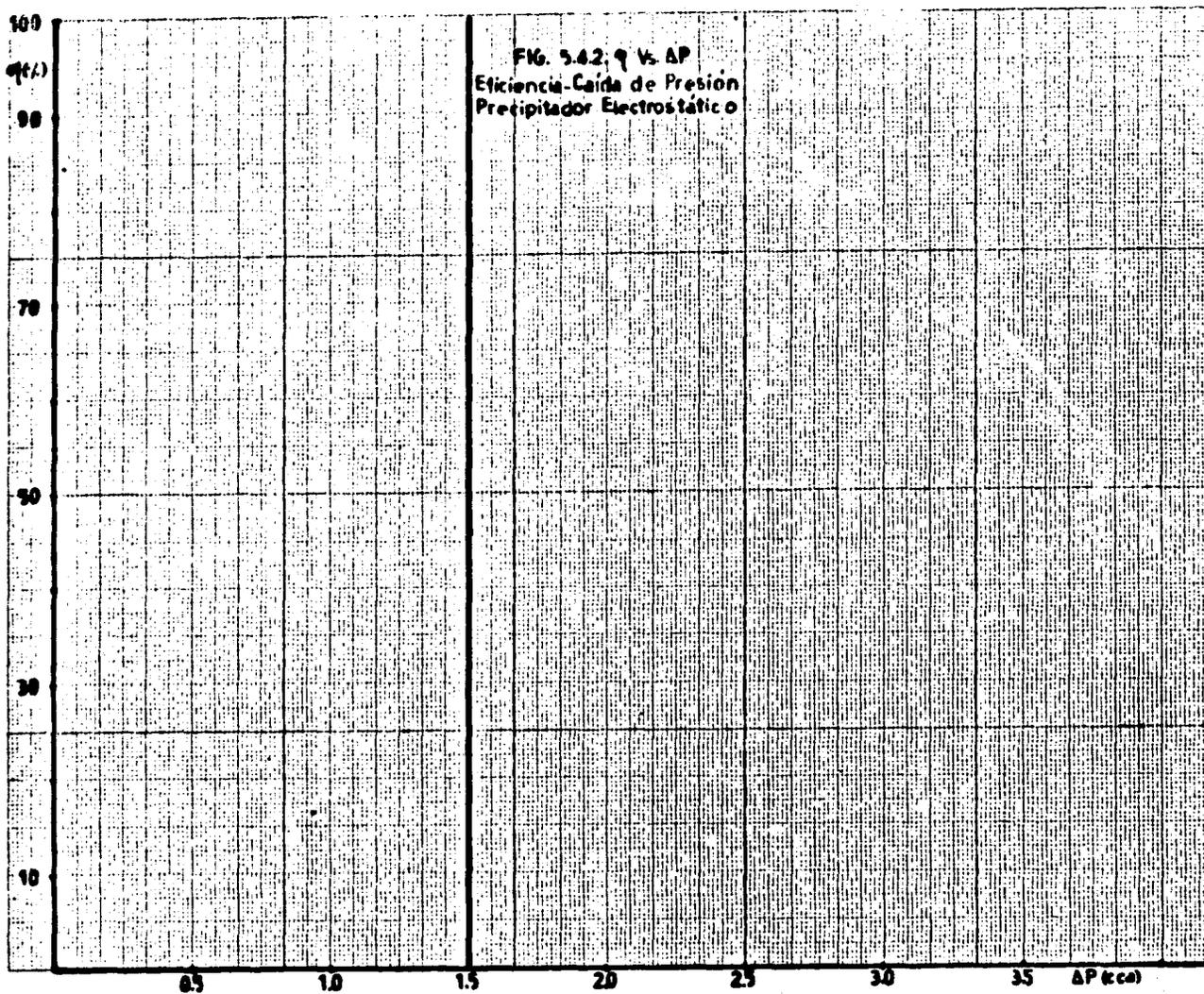


Fig. 5.02 q 15.  $D_p$   
Eficiencia-Diámetro de Partícula  
Precipitador Electrostático



tro de partícula de 5 micras, el costo de este aparato sería - el correspondiente a una Bc de 0.3 m.

Tabla 5.6.1. Precio de Venta según ancho de entrada.

Bc (m)	Precio de venta (\$)
0.5	76,859.06
0.4	50,935.68
0.3	30,396.24
0.2	12,601.29
0.1	3,623.51

La Tabla 5.6.1. se encuentra graficada en la figura 5.6.1

#### LAVADOR VENTURI

Se considerará una jornada de trabajo de ocho horas diarias y veinte días de trabajo efectivo mensual, lo que da un total de doscientos cuarenta días de trabajo anuales.

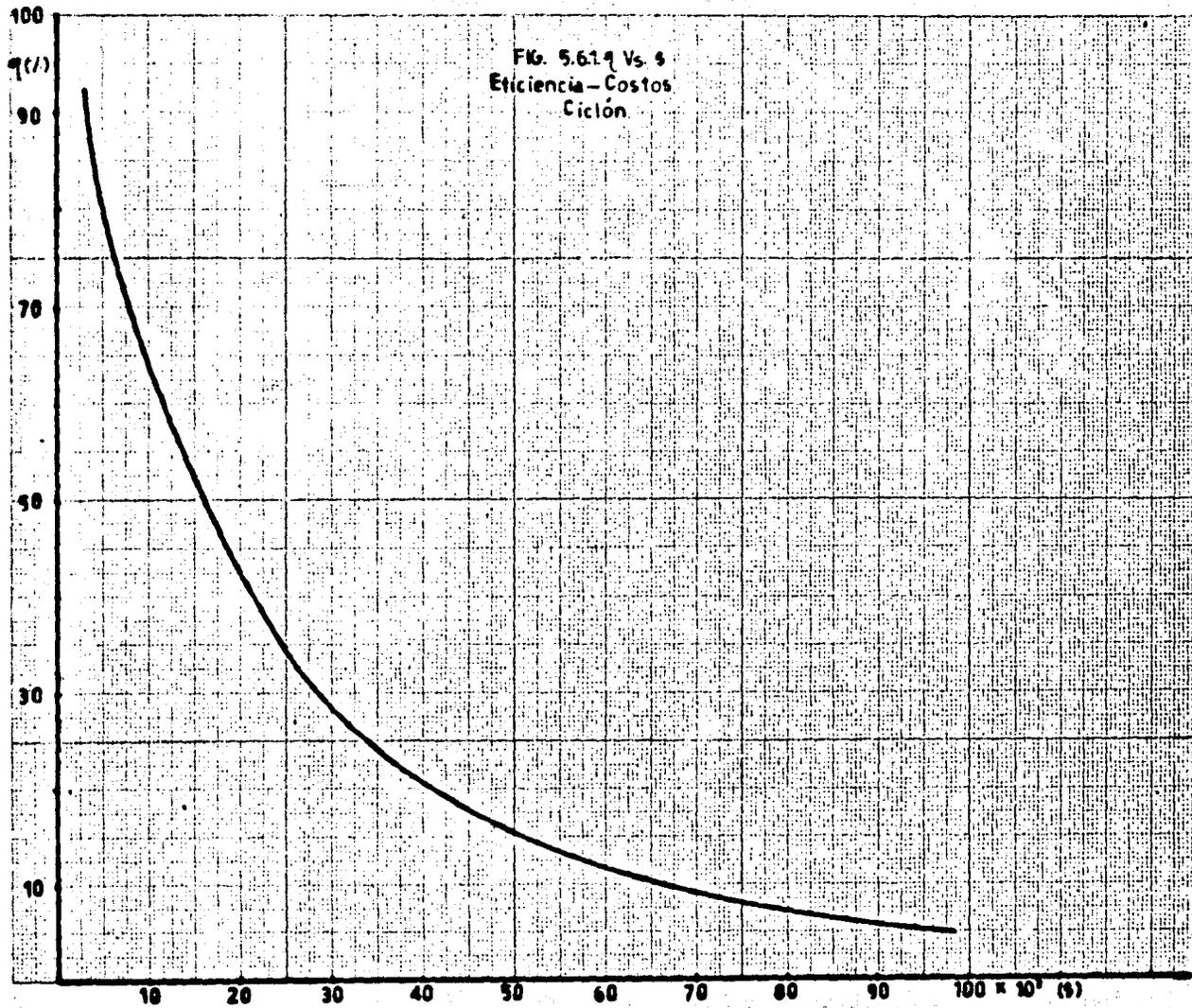
Para determinar el costo durante el primer año de trabajo consideraremos el costo del equipo más el costo de consumo de agua únicamente ya que son los factores más representativos del costo de operación del Venturi.

Para los diferentes consumos de agua (L') en galones por minuto, tenemos el siguiente consumo en metros cúbicos:

L' = 3.0 gpm	= 5.45 m <sup>3</sup> /día	= 218 m <sup>3</sup>	(bimestrales)
L' = 7.5 "	= 13.65 "	= 545 "	"
L' = 15.0 "	= 27.25 "	= 1,090 "	"
L' = 30.0 "	= 54.50 "	= 2,180 "	"
L' = 45.0 "	= 81.75 "	= 3,270 "	"

Aplicando la tarifa para consumo de agua de la "Tesorería del Departamento del Distrito Federal", primero se determina el consumo de dos meses y su costo, ya que los pagos por consumo de agua se hacen en forma bimestral. Para el costo anual únicamente se multiplica el costo bimestral por seis, y para el costo diario el costo bimestral se divide entre cuarenta.

En la Tabla 5.6.2 se consigna el costo del consumo de a -



gua bimestral y anual.

Tabla 5.6.2. Costo del consumo de agua bimestral y anual.

Consumo bimestral $\$/m^3$		Consumo anual $\$/m^3$	
$m^3$		$m^3$	
218	763	1,308	4,578
545	2,452	3,270	14,712
1,090	9,156	6,540	54,936
2,180	22,672	13,080	136,032
3,270	34,008	19,620	204,048

Presupuesto de materiales del tubo Venturi:

Lámina de hierro # 18 (\$12.00/Kg) -----	\$ 350.00
Soldadura de estaño -----	\$ 125.00
Espreas -----	\$ 500.00
Moto bomba "Jacuzzi", 1/4 HP, centrífuga -----	\$ 1,300.00
Mano de obra -----	\$ 500.00
<b>Total -----</b>	<b>\$ 2,775.00</b>

Así, a la Tabla 5.6.2 se le debe adicionar la cantidad de \$ 2,775.00 al costo por consumo de agua, obteniéndose la Tabla 5.6.3.

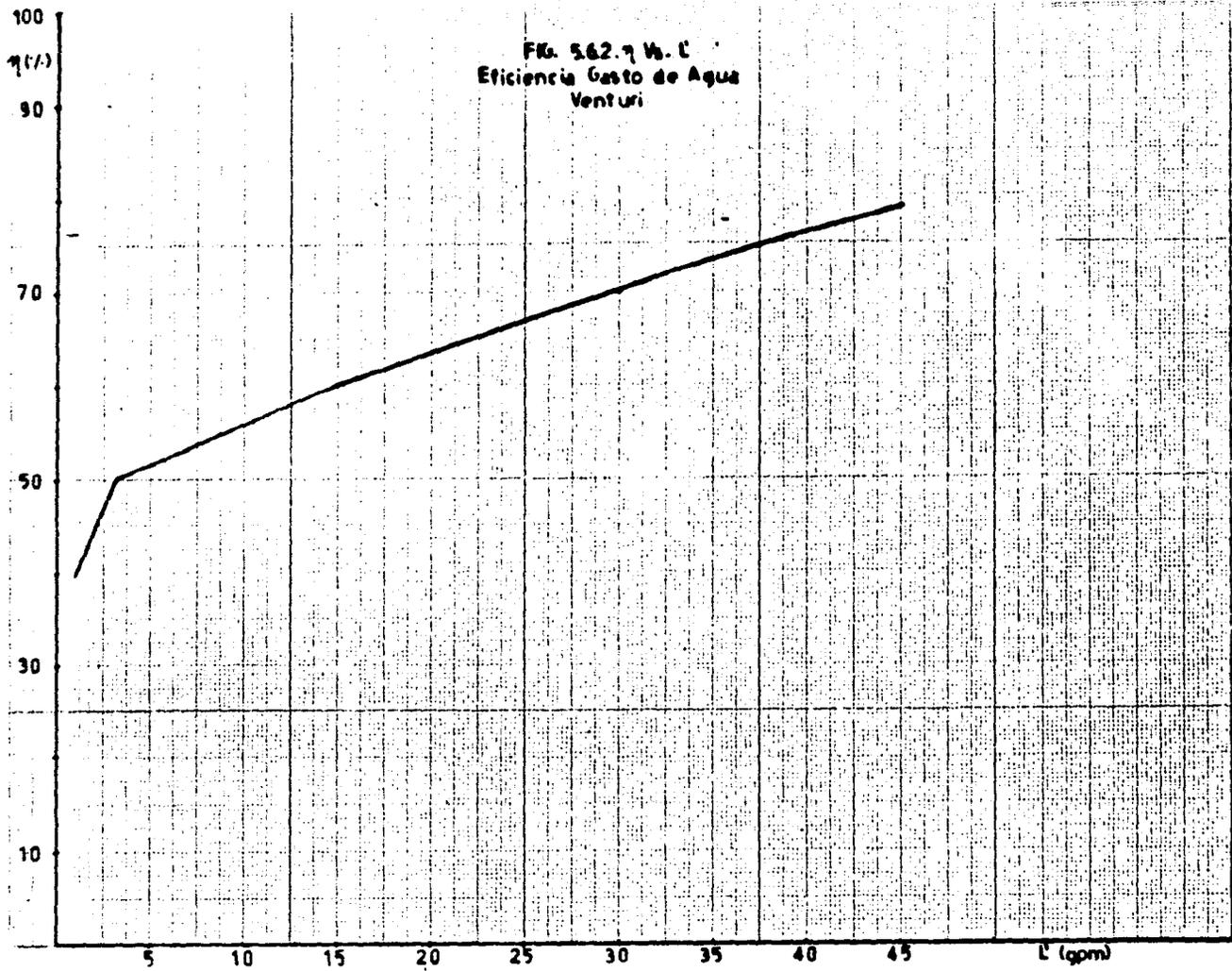
Tabla 5.6.3. Costo total del consumo de agua bimestral y anual

Consumo bimestral $\$/m^3$		Consumo anual $\$/m^3$	
$m^3$	(total)	$m^3$	(total)
218	3,538	1,308	7,353
545	5,227	3,270	17,487
1,090	11,931	6,540	57,711
2,180	25,447	13,080	138,807
3,270	36,733	19,620	206,823

#### CURVA COSTO-EFICIENCIA

Primero es necesario obtener la curva de eficiencia vs. - gasto de agua. Esta curva se saca tomando como diámetro medio- de partícula 6 micras y auxiliándose de la figura 5.2.2, en ba se a la eficiencia. Esta curva se grafica en la figura 5.6.2.

De la Tabla 5.6.3 tomando en cuenta el costo anual se lle ga a la curva de la figura 5.6.3, de la siguiente manera: para



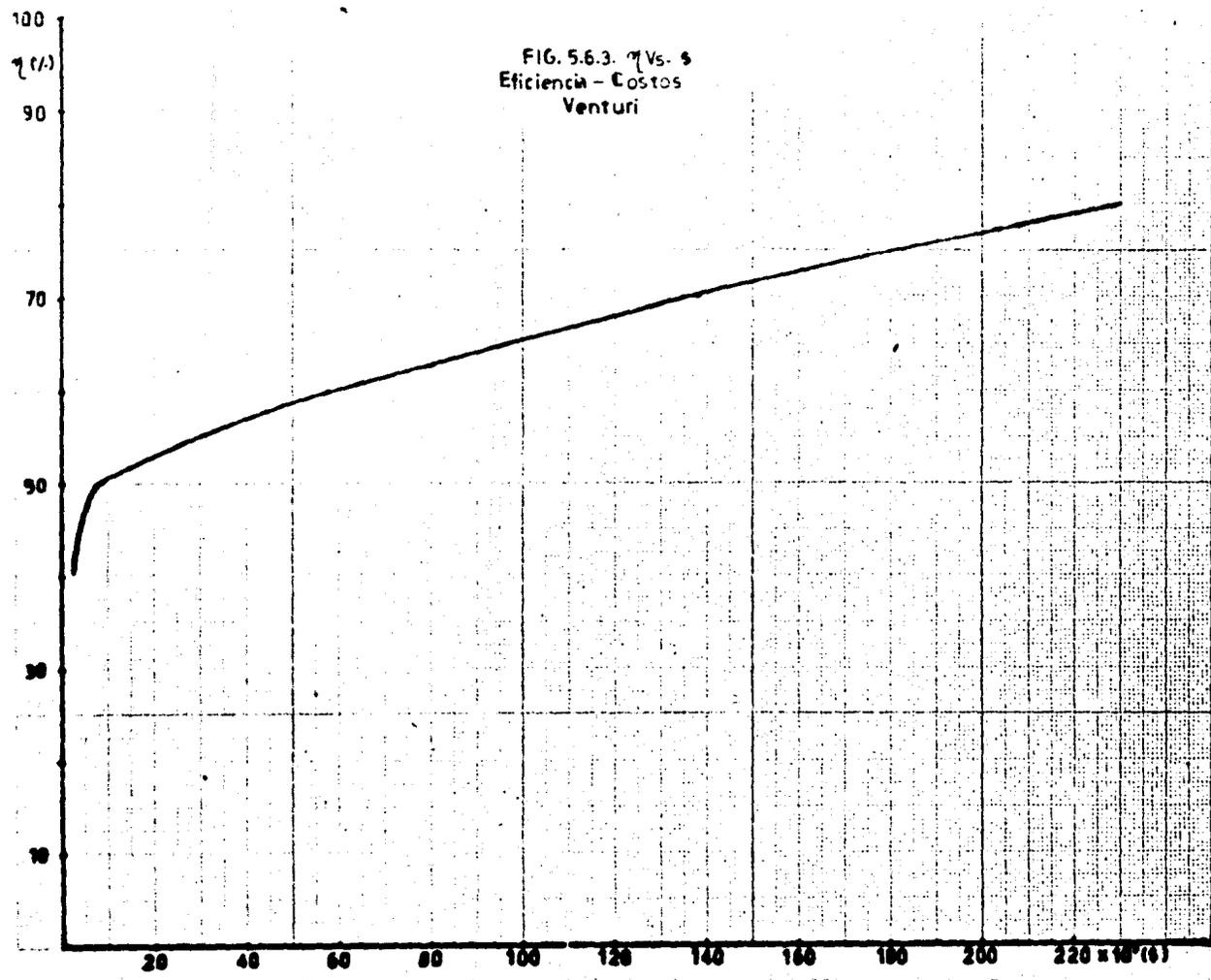


FIG. 5.6.3.  $\eta$  Vs.  $C$   
Eficiencia - Costos  
Venturi

un gasto de agua  $L' = 45 \text{ gpm}$  ( $19,620 \text{ m}^3$  anuales), tengo una eficiencia de 77.5% (de la fig. 5.6.2); este consumo de agua anual cuesta de acuerdo a la Tabla 5.6.3, \$ 206, 823.00, de esta forma se van graficando los diversos valores de eficiencia vs. costo obteniéndose la curva de la figura 5.6.3.

### FILTROS DE TELA

Debido a que este tipo de equipo de control no se manda a hacer de acuerdo al diseño individual sino que se tiene que comprar basandose en las capacidades determinadas por el fabricante, el costo del equipo que nosotros indicaremos para nuestros diferentes casos se extrapolará del costo del equipo que para este problema recomienda el fabricante.

El equipo de control propuesto por "Johnson March" (ver figura 5.6.4) para nuestro problema tiene las siguientes especificaciones:

Area de filtrado :  $400 \text{ pies}^2$  ( $37.161 \text{ m}^2$ )

Número de bolsas : 32

Volumen máximo de gases a filtrar:  $2,400 \text{ cfm}$  ( $1.132 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Costo : \$ 317,250.00

El costo por bolsa sería de \$ 9,914.00 (costo promedio incluyendo accesorios).

Utilizando este costo unitario calcularemos ahora el costo en nuestros diferentes casos.

Anexaremos 2 bolsas a cada uno de nuestros 4 casos para tener un excedente:

Para $n_1 = 10$ bolsas	\$ 99,140.60 (99.12% inicial)
" $n_2 = 13$ "	\$ 128,882.78 (68.20% " )
" $n_3 = 24$ "	\$ 237,937.44 (39.10% " )
" $n_4 = 108$ "	\$1,070,718.48 (13.59% " )

Es importante observar que mientras más eficiente es nuestro equipo, más pequeño es y, por lo tanto, más barato. Sin embargo, sus costos de operación son enormes como se verá en -

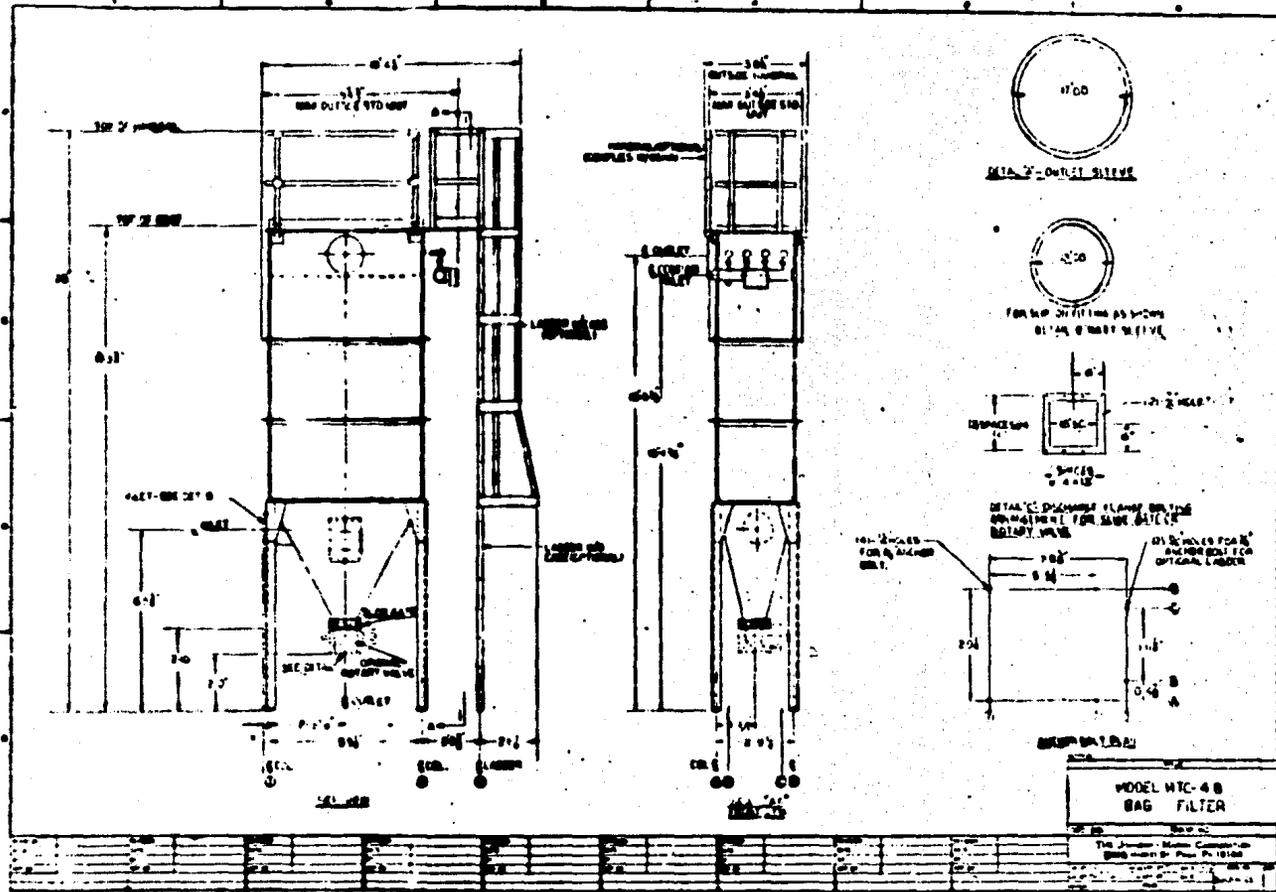


FIGURE 5.84.

<b>MODEL WTC-4B</b>	
<b>BAG FILTER</b>	
<small>           THE JOURNAL - MASON COMPANY            2000 NORTH BROADWAY, PHOENIX, ARIZONA            TEL. 254-1111         </small>	

guida.

Los costos totales durante el primer año son los siguientes:

Costo total = Costo de equipo + Costo de operación.

El costo de operación lo reduciremos únicamente al cambio de bolsas, ya que es el más significativo. El costo de la bolsa de orlón (sola) es aproximadamente de \$ 600.00.

Consideraremos el mismo ciclo de trabajo que para el Venturi (8 horas diarias durante 240 días al año).

Para  $n_1 = 10$  bolsas, tenemos:

Costo del equipo : \$ 99,140.60

Se cambian bolsas cada 8 horas. Por lo tanto, el costo de bolsas anual es de \$ 1, 440,000.00

Costo total: \$ 1,539,140.60

Para  $n_2 = 13$  bolsas, tenemos:

Costo del equipo : \$ 128,882.78

Se cambian bolsas cada 11 días. Por lo tanto, el costo anual es de \$ 171,600.00

Costo total: \$ 300,482.78

Para  $n_3 = 24$  bolsas, tenemos:

Costo del equipo: \$ 237,937.44

Se cambian bolsas cada 6 meses. Por lo tanto, el costo anual es de \$ 28,800.00

Costo total: \$ 266,734.44

Para  $n_4 = 108$  bolsas, tenemos:

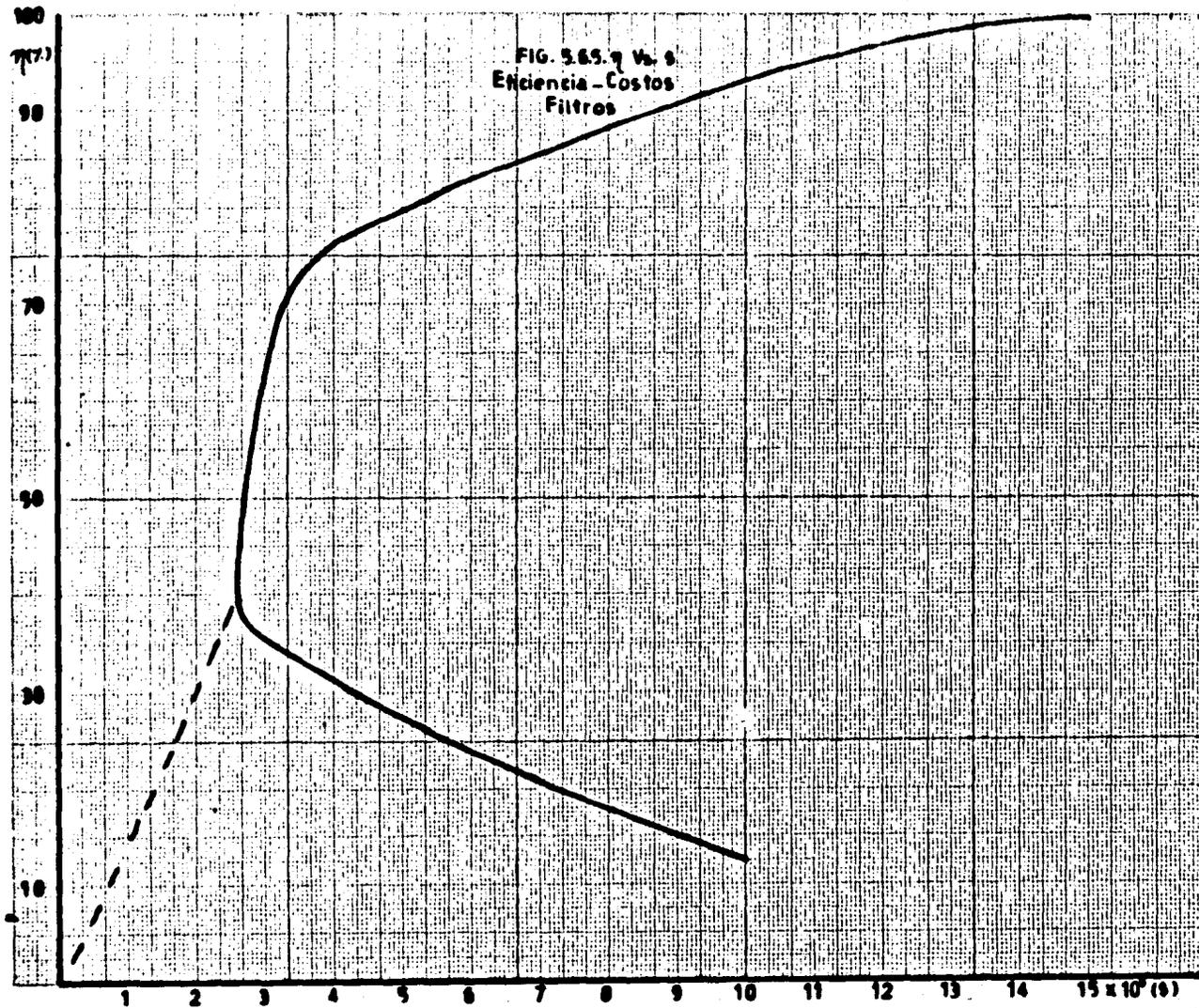
Costo del equipo: \$ 1,070,718.48

Durante el primer año no se cambian bolsas. Así que el costo total es el mismo del equipo.

Estos datos se vaciaron en la gráfica de la figura 5.6.5.

De la gráfica vemos que el equipo que más conviene es el que tiene 24 bolsas (\$ 266,734.44).

Hay varias observaciones importantes que hacer:



1. Como ya vimos, el equipo más eficiente es el más barato, pero sus costos de operación son los más altos. Así que, - este equipo no es recomendable.

2. El equipo más caro es el que tiene menores costos de operación. Durante el primer año es muy caro, pero a medida que va transcurriendo el tiempo se va abaratando ya que el cambio de bolsas en este equipo se realiza hasta los 6 años de trabajo. Por lo que, llega el momento en que el costo anual es el más reducido de todos y esto se muestra en la parte punteada de la curva de la figura 5.6.5. De cualquier forma este equipo no es recomendable debido a que está muy sobrado de capacidad.

3. La eficiencias que se indican son estando el equipo nuevo. Después de la primera limpieza aumenta considerablemente la eficiencia; y, a medida que se va utilizando aumenta más. Por ejemplo, el equipo de control seleccionado por nosotros comienza a trabajar con 39.10% de eficiencia, después de la primera limpieza (que ocurre a las 3.762 horas) la eficiencia inicial será ahora de 72%.

4. La vida útil de las bolsas del filtro es variable en cada uno de los diferentes equipos de control debido a que están sometidas a diferentes esfuerzos de trabajo (ver tiempos de limpieza, Tabla 5.3.4). Se ve claro que la bolsa que se limpia cada 46.59 segundos durará mucho menos tiempo que la que se limpia cada 130.533 horas.

#### PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

El costo aproximado de un precipitador electrostático se puede determinar teniéndose un valor promedio de \$ 3,000.00 - por metro cuadrado de área de colección, más un 20% por concepto de instalación y más un 30% por concepto de equipo complementario (rectificador de alta tensión, estación o panel de control).

Para diferentes eficiencias se tienen diferentes áreas de colección y diversos costos, según lo muestra la Tabla 5.6.4.

Tabla 5.6.4. Eficiencia, área y costo del precipitador electrostático.

E (%)	A (m <sup>2</sup> )	Costo (\$)	E (%)	A (m <sup>2</sup> )	Costo (\$)
10.0	0.994	4,472.30	99.1	44.430	199,935.00
20.0	2.105	9,471.90	99.2	45.540	204,930.00
30.0	3.364	15,139.90	99.3	46.800	210,600.00
40.0	4.820	21,683.10	99.4	48.260	217,170.00
50.0	6.540	29,422.20	99.5	49.980	224,899.00
60.0	8.643	38,894.01	99.6	52.100	234,450.00
70.0	11.350	51,105.24	99.7	54.800	246,600.00
80.0	15.180	68,316.34	99.8	58.620	263,790.00
90.0	21.720	97,738.24	99.9	65.200	293,400.00
99.0	43.440	195,480.00			

Los costos de operación del precipitador electrostático se reducirán al consumo de energía.

Se puede determinar la energía suministrada a un precipitador electrostático dependiendo del volumen de gases manejado usando las Tablas de "Heinrich y Anderson" (Industrial Gas Cleaning. W. Strauss, 1966. Tabla 18.8, pág. 393), para lo cual tenemos:

$$Q = 3,736 \text{ m}^3/\text{hr} = 2198.75 \text{ pcm.}$$

Si el horno funciona 8 horas diarias, entonces:

$$Q = 1,050,400 \text{ pcm/día}$$

Como trabaja 240 días al año (1920 horas) y puesto que en la C.F.E. los pagos se efectúan bimestralmente (320 horas) tenemos que:

$$Q = 42,216,000 \text{ pcm/bimestre}$$

Según "Heinrich y Anderson", la energía suministrada a un precipitador electrostático será en forma aproximada de 34 Kw/100,000 pcm de gases manejados, consecuentemente:

$$100,000 \text{ pcm} \text{ ----- } 34 \text{ Kw}$$

$$42,216,000 \text{ pcm} \text{ ----- } 14,353 \text{ Kw}$$

El consumo de energía será pues de 44.85 Kw/hr. Según las "Tarifas Generales Autorizadas de la C.F.E", para este caso el Kw/hr tiene un costo de \$ 0.4781; por lo tanto, en un bimestre el costo de energía más un 10% de impuesto será de \$ 7,548.90. Finalmente, el costo de operación en un año será de: \$ 45,293.40.

Si consideramos un diseño particular (ver figura 5.6.6) - en el que se tenga:

- $A_p$  = altura de placa = 3 m.
- $E_p$  = espacio entre placas = 0.20 m
- $N_p$  = número de placas = 5
- $L_p$  = longitud de placa
- $A_s$  = área seccional
- $A_c$  = área de colección.

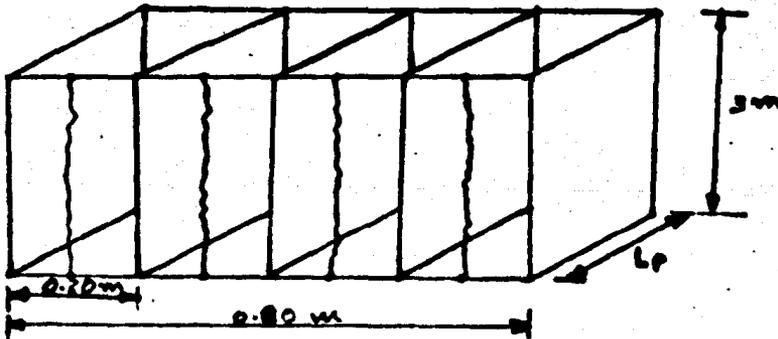


Figura 5.6.6. Diseño particular

$$A_s = 4(E_p)(A_p) = 4(0.20)(3) = 2.4 \text{ m}^2$$

Si:

$$Q = 1.037 \text{ m}^3/\text{seg}; \quad V = \frac{Q}{A_s} = \frac{1.037}{2.4} = 0.432 \text{ m/seg}$$

$$A_c = (5(2) - 2) (A_p L_p); \text{ despejando } L_p:$$

$$L_p = \frac{A_c}{8A_p}$$

Considerando el área de colección para eficiencias de 50, 90, 99 y 99.9%, obtenemos la Tabla 5.6.5.

Tabla 5.6.5 Diferentes valores de  $A_p$ ,  $E_p$ ,  $N_p$  y  $L_p$  en función de la eficiencia

	50%	90%	99%	99.9%
$A_p$	3.00 m	3.00 m	3.00 m	3.00 m
$E_p$	0.20 m	0.20 m	0.20 m	0.20 m
$N_p$	5.00 m	5.00 m	5.00 m	5.00 m
$L_p$	0.27 m	0.91 m	1.80 m	2.72 m

Análogamente, determinamos el costo del precipitador más el costo de operación por año dependiendo de su eficiencia. Este costo total se consigna en la Tabla 5.6.6, la cual se grafica en la figura 5.6.7.

Tabla 5.6.6. Costos totales en función de la eficiencia.

(%)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	Costo total
50.0	6.540	74,715.60
90.0	21.720	143,031.64
99.0	43.440	240,773.40
99.9	65.200	338,693.40

Considerando un  $D_p$  de 5 micras y según la figura 5.4.1 de eficiencia vs. diámetro de partícula, el precipitador más adecuado para aplicarse, es aquél que opera con 99% y cuyo costo total es de \$ 240,773.40.

Se agradece al Ing. Jaime Razo Aguilar de "Técnicos del Aire, S.A." la valiosa ayuda prestada para la realización del presente capítulo.

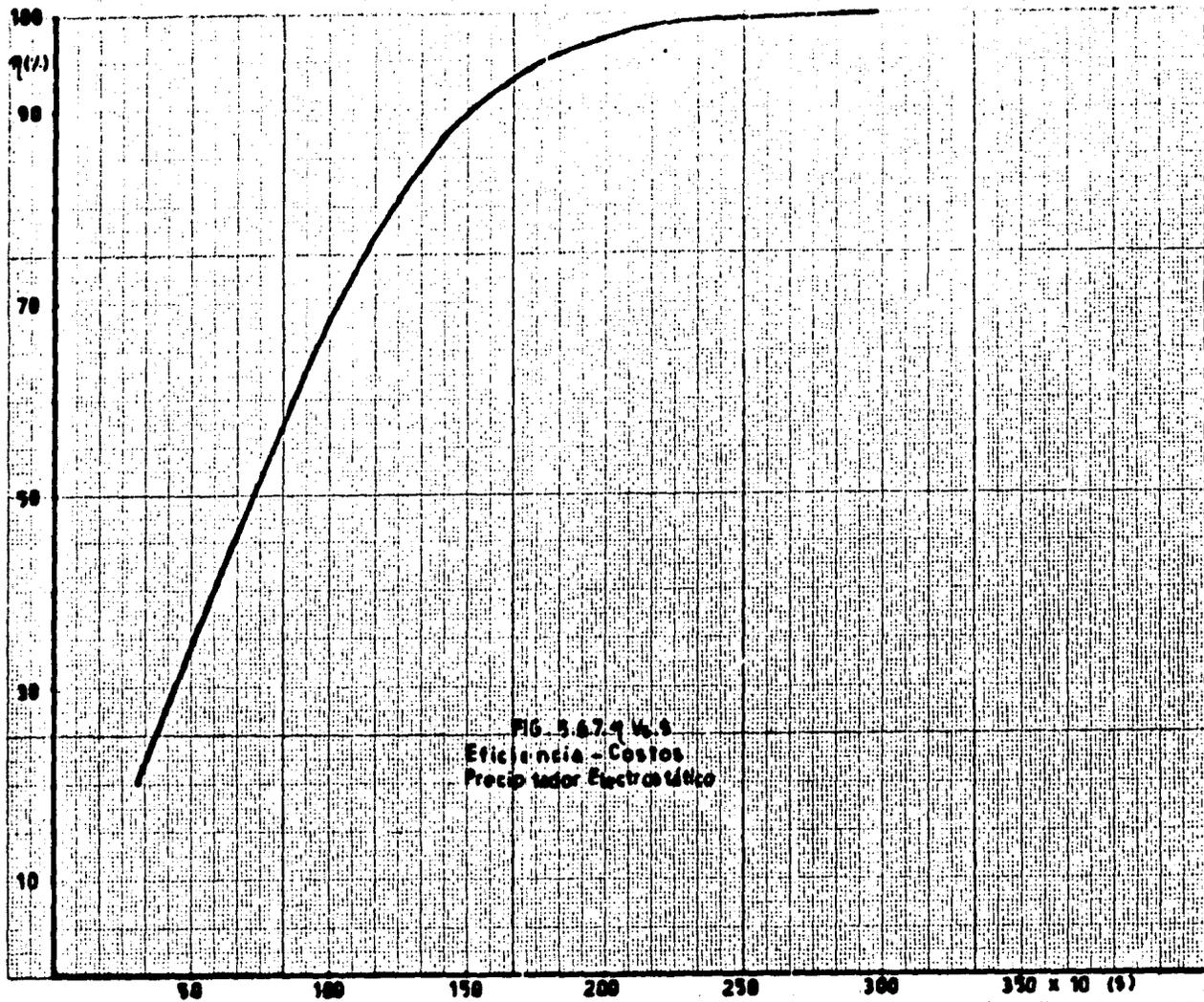


FIG. 5.67.4 V. 9  
Eficiencia - Costos  
Precipitador Electrostatico

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

1. En base a las características del horno, se tiene una-emisión de polvos de 24.3 Kg/hr. Según la Tabla 2.4.1 se permite una emisión de polvos de 17.064 Kg/hr; tomando esto en con-sideración y para estar dentro del reglamento actual, el apartado de control instalado deberá operar con una eficiencia mínima de 70.22%.

Según la gráfica de eficiencia contra costos actuales, de la figura 6.1, el equipo de control más recomendable para esta eficiencia es el precipitador electrostático, seguido del lavadoror Venturi y por último el filtro de bolsas.

2. El ciclón no se ha tomado en cuenta debido a que en un horno de arco eléctrico se tienen emisiones de partículas sumamente pequeñas (1.5 micras como diámetro medio), y por lo tanto, se le considera más bien como un prelimpiador; es decir, -es aplicable en alguna parte del proceso donde las partículas-a coleccionar sean apreciablemente grandes.

3. Tomando en cuenta el crecimiento del costo de la vida, puede estimarse que en unos 10 años, el agua para el Venturi,- la tela para los filtros y la energía eléctrica para el precipitador electrostático tengan un aumento en los costos de 75,- 300 y 220% respectivamente. Si para entonces sigue en vigencia la misma reglamentación actual permitiendo 70.22% como eficiencia mínima, entonces será más barato utilizar el lavador Venturi que el precipitador electrostático y que el filtro de tela, como puede verse en la figura 6.2.

4. Ahora bien, es lógico pensar que hacia el futuro la reglamentación para el control de emisiones contaminantes será - más estricta que la actual. De la misma gráfica del punto anterior, figura 6.2, podemos observar que hasta una eficiencia - del 80% el costo del lavador Venturi es menor que el del preci

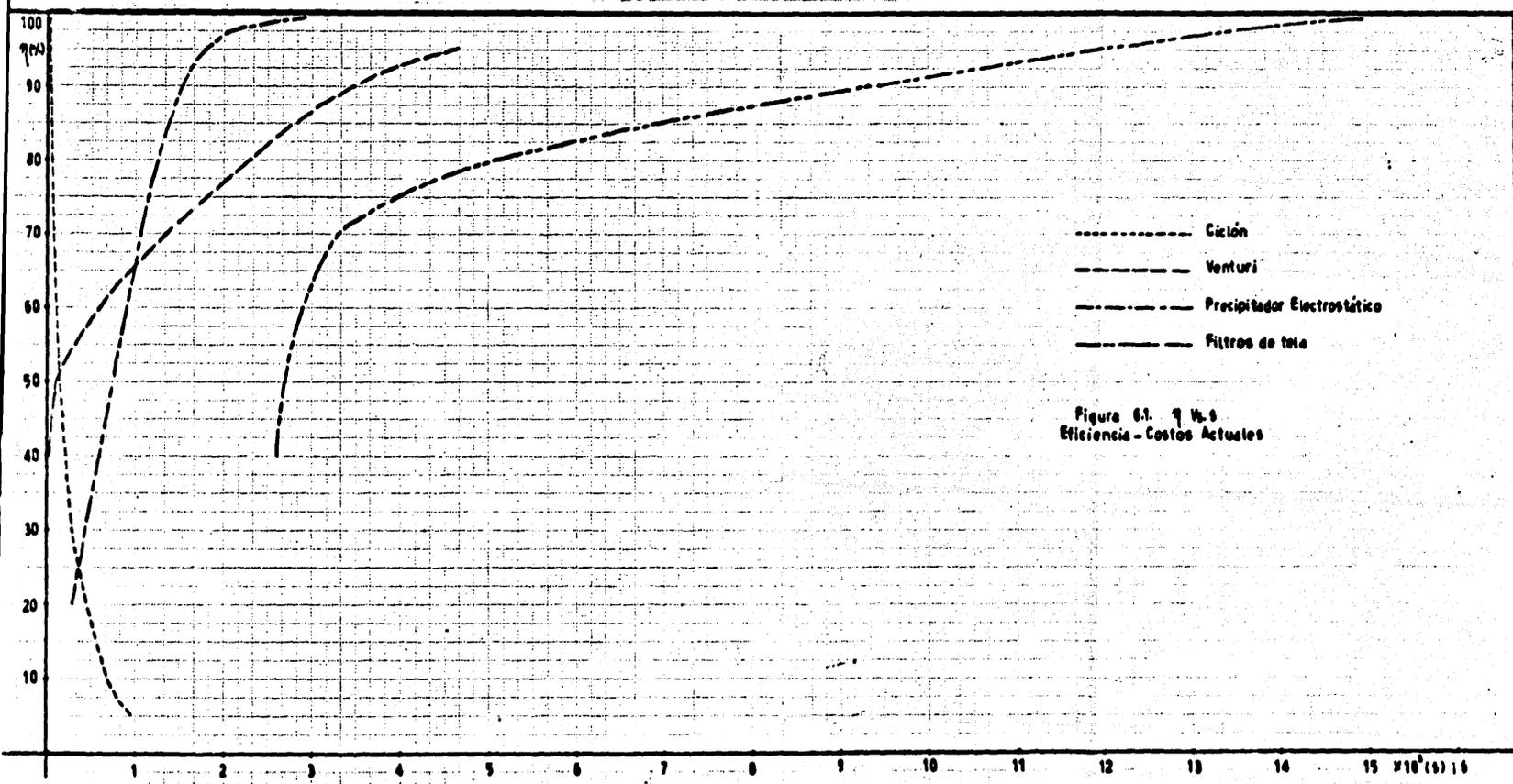


Figura 6.1. 9 M. S.  
 Eficiencia - Costos Actuales

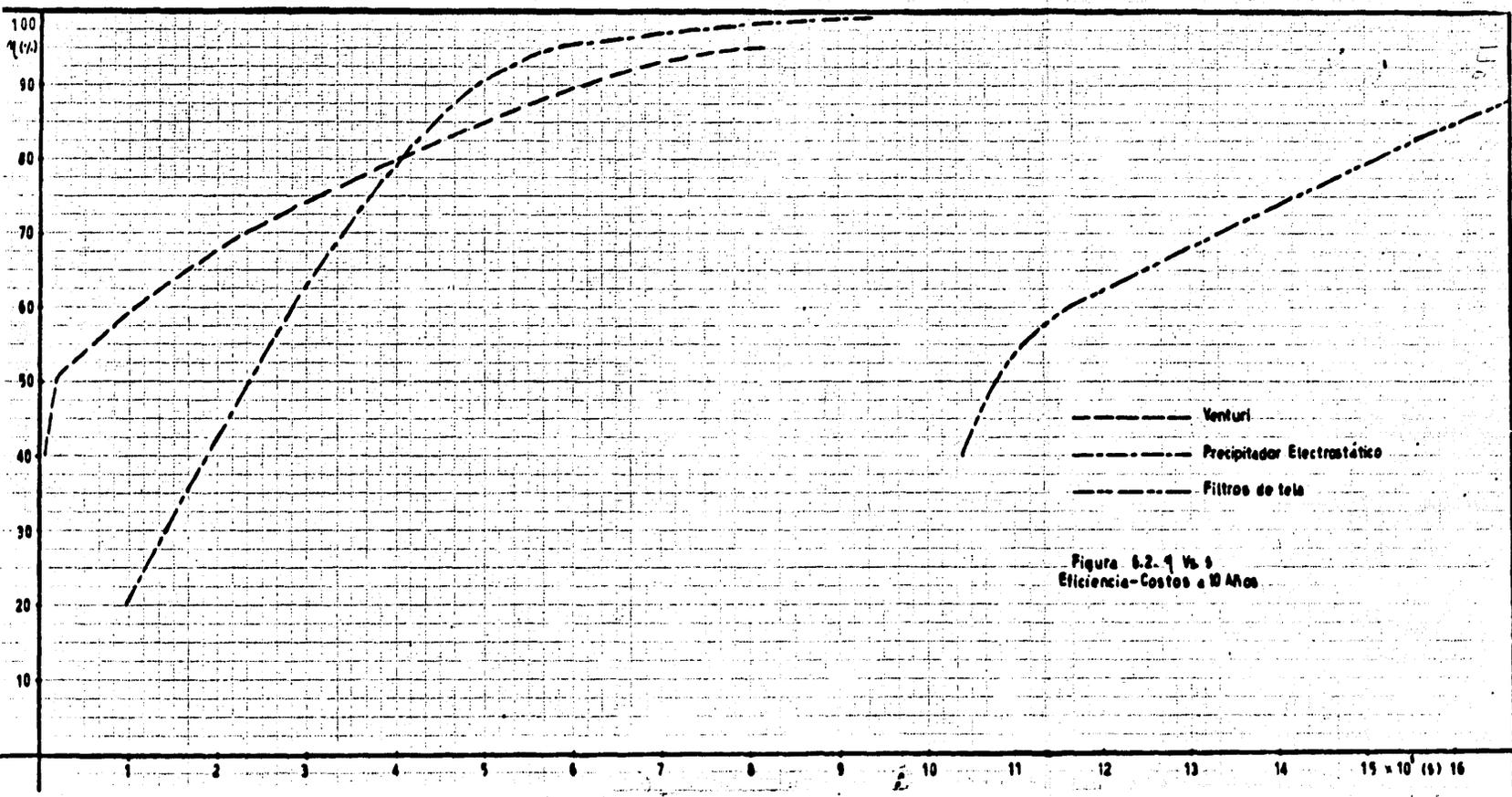


Figura 6.2.9 Vb 9  
 Eficiencia-Costos a 10 Años

pitador electrostático. Del 80% para arriba el precipitador electrostático sale más barato.

Los filtros de tela como se puede ver en la gráfica, no tienen mucho futuro dentro de la Industria Siderúrgica porque serán demasiado caros.

5. Se debe tener especial interés en evitar la emisión de partículas de 1 a 4 micras de diámetro ya que se encuentran en el rango respirable y pueden producir serios trastornos pulmonares. De acuerdo a esto, la gráfica de la figura 6.3 (eficiencia contra diámetro de partícula) indica que los aparatos más recomendables para la colección de estas partículas son los precipitadores electrostáticos y los filtros de tela.

6. Existe un factor muy importante que debe tenerse en cuenta en la selección de un equipo colectos: la caída de presión.

Viendo la figura 6.4, en el caso del ciclón, al aumentar la eficiencia de colección para un diámetro de partícula pequeño no aumenta considerablemente la caída de presión, esto hará necesario el uso de potentes ventiladores de características muy especiales lo cual finalmente repercutirá en un importante aumento en los costos de operación e instalación. El lavador Venturi también trabaja con grandes caídas de presión cuando se trata de eficiencias altas haciendo costoso el equipo adicional. Los filtros de tela operan con caídas de presión regulares y por último, los precipitadores electrostáticos son los que funcionan con las caídas de presión más pequeñas.

7. Como última conclusión, creemos importante y necesario hacer recalcar que la curva de la figura 6.1 (eficiencia contra costo actual), será un poderoso auxiliar para la buena selección de un equipo de control de emisiones contaminantes en la Industria Siderúrgica.

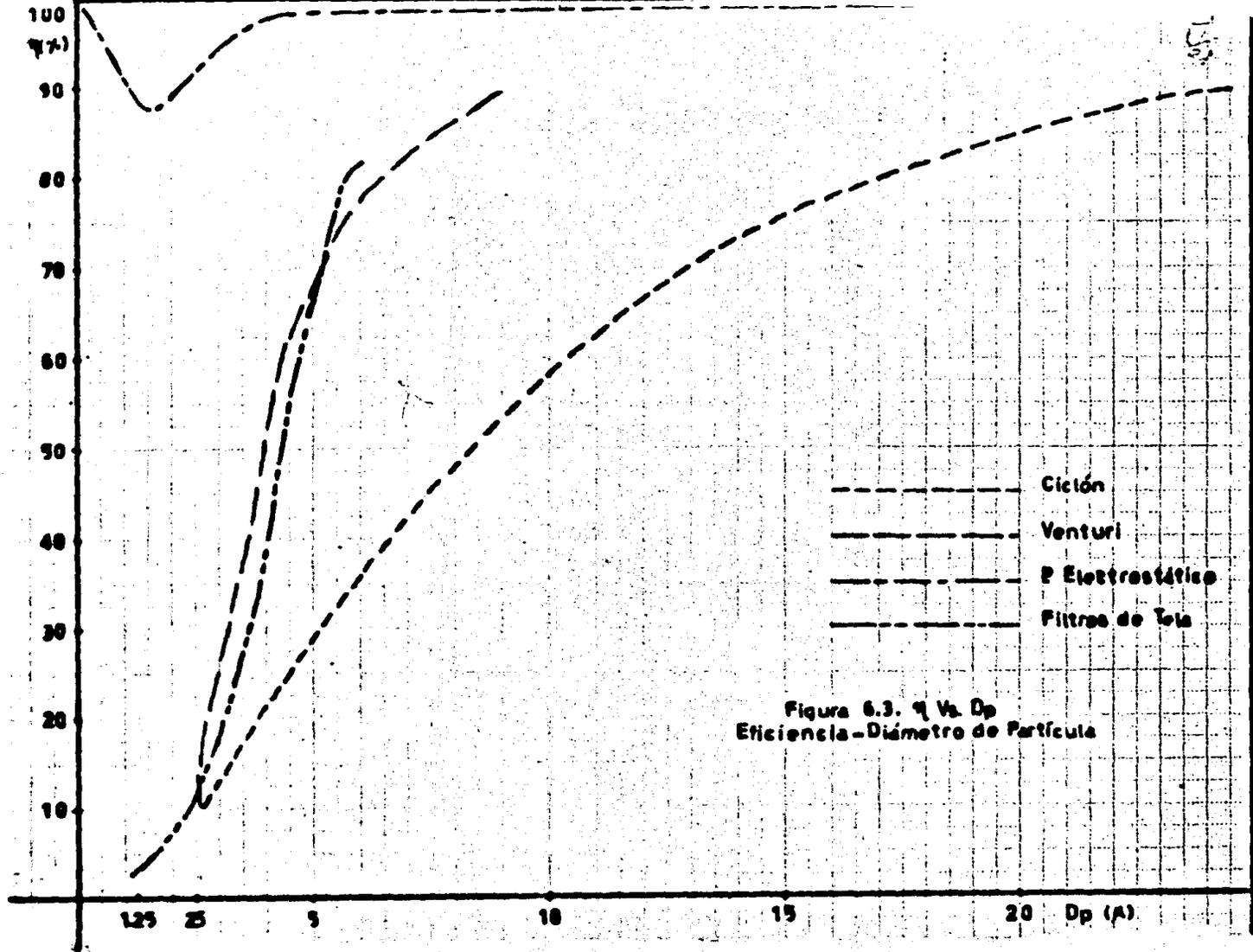


Figura 6.3.  $\eta$  Vs.  $D_p$   
 Eficiencia - Diámetro de Partícula

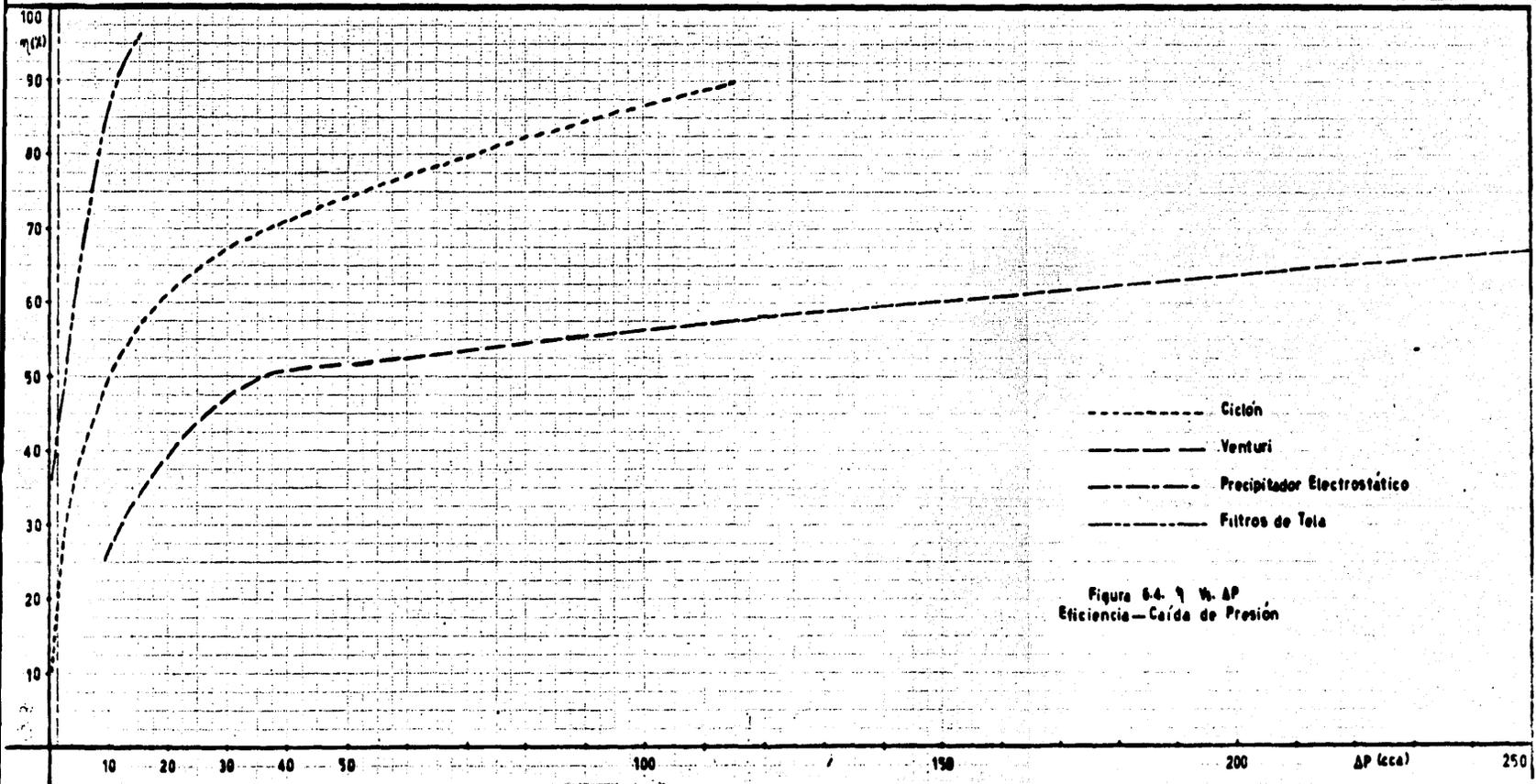


Figura 6.4. 9  $\eta$ - $\Delta P$   
 Eficiencia—Caída de Presión

## BIBLIOGRAFIA

Lund, H. P.

Manual para el Control de la Contaminación Industrial  
Instituto de Estudios de Administración Local, 1974

I.C.A.F.A.

Contaminación en la Industria Siderúrgica  
I.C.A.F.A., 1975

Stern, A. C.

Air Pollution  
Vol. I, II y III  
Academic Press, 1964

Environmental Protection Agency  
Air Pollution Engineering Manual  
Publication AP-46, 1976

Lacheras, E.J.

Tecnología del Acero  
C.J.E., 1967

AHMSA

Manual AHMSA 75/76  
AHMSA, 1976

AHMSA

Compendio de Términos Siderúrgicos  
AHMSA, 1976

Ross, R.D.

La industria y la Contaminación del Aire  
Diana, 1974

**Strobbe, M.A.**

**Orígenes y Control de la Contaminación Ambiental  
Control Regional de Ayuda Técnica, 1973**

**Environmental Protection Agency**

**Compilation of Air Pollution Emissions Factors  
E.P.A., marzo 1975**

**Krekeler, K.A.**

**Fundición**

**Gili, 1971**

**Marchello, Joseph M.; Kelly, John J.**

**Gas Cleaning for Air Quality Control**

**Marcel Dekker, Inc., 1975**

**Dorman, R.G.**

**Dust Control and air cleaning**

**Pergamon Press, 1974**

**Ledbetter, J.O.**

**Air Pollution Control**

**Partes A y B**

**Marcel Dekker, 1973**

**OECD**

**Air Pollution in the Iron and Steel Industry**

**OECD, 1973**

**Strauss, W.**

**Industrial Gas Cleaning**

**Pergamon Press, 1971**

**Crawford**  
**Air Pollution Control Theory**  
**Mc. Graw Hill, 1976**

**SELMEC**  
**Manual de Datos Técnicos:**  
**SELMEC, 1976**

**Texas Air Control Board**  
**Compliance Sampling Manual, 1975**

**C.F.E.**  
**Tarifas Generales Autorizadas**

**Tesorería del Departamento del Distrito Federal**  
**Tarifas para Consumo de Agua**

**Howard, E.E.**  
**Tratado Práctico de Fundición**  
**Aguilar, 1962**