

116  
2j



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DISEÑO DE UN COLECTOR DE PARTICULAS  
PARA MOTORES A DIESEL**

**TESIS PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
ELISEO MARTINEZ ESPINOSA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. ARMANDO MALDONADO SUSANO**

**MEXICO, D. F.**

**1996**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## **AGRADECIMIENTOS**

**Al recinto donde me forme no solo como profesionalista sino como hombre, a ti que me enseñaste "por mi raza hablará el espíritu" mi querida UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.**

**A los compañeros del Departamento de Termoeenergía y Mejoramiento Ambiental, por las facilidades y ayuda prestada para la realización del proyecto.**

**A los compañeros laboratoristas, que apoyaron en todo momento la realización del proyecto.**

## **RECONOCIMIENTOS**

A ustedes que con su esfuerzo y confianza depositada en mí, han dado todo sin pedir nada a cambio y han sido un ejemplo a seguir, a ustedes en especial dedico éste trabajo **MIS AMAMOS PADRES.**

**AL ING. ARMANDO MALDONADO SUBANO**  
que fue más que un director de tesis, fue un  
verdadero amigo.

A todos mis **AMIGOS** con los que compartí  
muchas anécdotas y vivencias que forjaron  
en mí un pensamiento por el cual viví.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>II</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>V</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>EFFECTOS DE LAS PARTICULAS EN EL SER HUMANO</b>	
1.1 GENERALIDADES .....	2
1.2 CLASIFICACION DE LAS PARTICULAS .....	4
1.3 ESQUEMATIZACION DE LAS PARTICULAS CONTAMINANTES .....	6
1.4 AFECIONES DE LOS DIFERENTES CONTAMINANTES .....	8
1.5 EFFECTOS A LA SALUD .....	10
<b>CAPITULO II</b>	
<b>EQUIPOS PARA LA ELIMINACION DE PARTICULAS</b>	
2.1 GENERALIDADES .....	15
2.2 COLECTORES MECANICOS .....	16
2.3 COLECTORES POR FILTRACION A TRAVES DE UN MEDIO POROSO .....	25
2.4 LAVADORES Y ABSORBEDORES POR VIA HUMEDA .....	30
2.5 PRECIPITADORES ELECTRICOS .....	36
2.6 AGLOMERADORES SONICOS .....	40
<b>CAPITULO III</b>	
<b>DISEÑO DEL COLECTOR DE PARTICULAS</b>	
3.1 GENERALIDADES .....	42
3.2 FUNDAMENTOS TEORICOS .....	46
3.3 CONSIDERACIONES PRACTICAS .....	55
3.4 DISEÑO EL CICLON .....	59
3.5 RESULTADOS TEORICOS .....	62
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>PRUEBAS REALIZADAS AL EQUIPO</b>	
4.1 CARACTERISTICAS DEL TURBOSOPLADOR .....	73
4.2 ADAPTACION DEL CICLON AL TURBOSOPLADOR .....	75
4.3 PRUEBAS REALIZADAS .....	76
4.4 RESULTADOS OBTENIDOS .....	79
4.5 RESULTADOS GRAFICOS .....	83
<b>CAPITULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1 CONCLUSIONES .....	90
5.2 RECOMENDACIONES .....	92
<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b> .....	<b>94</b>

## INTRODUCCION

El motor diesel, inventado por Rudolph Diesel es una máquina de combustión interna que funciona en base a un ciclo termodinámico abierto, donde los productos de la combustión no pueden ser reutilizados, de manera que continuamente se tienen que desalojar a la atmósfera e inyectar aire nuevo.

Las emisiones producidas en los motores de combustión interna tienen efectos nocivos en el medio ambiente, por lo cual es importante controlar dichas emisiones. Son muchos los factores que influyen en las emisiones de motores Diesel como; tiempo y proporción de inyección de combustible, relación de compresión, velocidad del motor, diseño de los pistones y cilindro, uso de las precámaras de combustión, entre otros.

Las emisiones provenientes de procesos industriales y de combustión conllevan partículas contaminantes que son extremadamente inestables debido a diversos factores que interactúan simultáneamente como son; procesos de adsorción, evaporación, condensación, procesos fotoquímicos, reacciones en fase líquida y gaseosa, heterogeneidad, etc. Las partículas contaminantes en el caso de motores Diesel, productos de una mala combustión, son el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) principalmente.

El aire es indispensable para la vida sobre la Tierra y la adición de materia indeseable transportada por el aire cambia la composición atmosférica del medio ambiente perjudicando la vida y alterando ecosistemas. Un control adecuado de partículas contaminantes provenientes de procesos de combustión es de carácter indispensable en la actualidad, ya que los niveles de contaminación existentes en el planeta y en específico en la Cd. de México son alarmantes. Siendo arrojados a la atmósfera diariamente una gran cantidad de desechos tóxicos que reacciona con los componentes del aire, disminuyendo así la calidad del que respiramos.

Se definen los contaminantes del aire como sustancias que no se consideran como componentes naturales del mismo o exceso de alguno de ellos.

### Componentes naturales:

- Nitrógeno ( 780 900 ppm )
- Oxígeno ( 209 400 ppm )
- Gases inertes ( argón 9300ppm , neón 18ppm , helio 5ppm , kriptón y xenón 1ppm )
- Metano ( 315 ppm )
- Dióxido de carbono ( 9325 ppm )

- Hidrógeno ( 0.5 ppm )

**Contaminantes naturales:**

- Oxidos de nitrógeno ( 0.52 ppm )
- Ozono ( 0.02 ppm )

**Contaminantes no naturales:**

- Oxidos de carbono.- se producen al quemar combustibles como el carbón, petróleo y gas natural.
- Hidrocarburos.- son introducidos a la atmósfera por una combustión incompleta de combustibles que contienen carbono y por la evaporación de líquidos como la gasolina o el rociado de pinturas.
- Oxidos de azufre.- el azufre se encuentra en el carbón y petróleo, por lo cual la combustión de éstos produce  $SO_2$  y el  $SO_3$  se forma directamente a partir de  $SO_2$ .
- Oxidos de nitrógeno.- se producen en cualquier proceso de combustión que tenga lugar en el aire, el escape de los autos constituye una fuente significativa de éstos.

La Ciudad de México ha experimentado un acelerado crecimiento en su población y territorio, así como en sus actividades productivas y la intensidad de su consumo energético. La quema de combustibles en el transporte, la industria, los servicios y los hogares se convirtió simultáneamente en una de las más importantes fuentes de bienestar para los habitantes de la ciudad y en causa de la emisión de contaminantes a la atmósfera, entre los cuales se encuentran las partículas.

En la Ciudad de México, la emisión de partículas primarias es de menor importancia en los procesos de combustión, transformación industrial, las quemas de residuos y otros procesos varios relacionados con el transporte, la industria y los servicios. Sin embargo, en estos procesos se emiten compuestos químicos ( como bióxido de azufre, óxido de nitrógeno e hidrocarburos ) que actúan en la atmósfera como precursores de la formación de contaminantes de origen secundario.

La evaluación de la calidad del aire, en la ciudad de México, se realiza en base a la información generada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico ( RAMA ), la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México ( CMPCCAVM ) emite diariamente un reporte sobre la calidad del aire en la forma del índice metropolitano de la calidad del aire ( IMECA ), el cual describe numéricamente los niveles de contaminación. La determinación del IMECA se realiza a partir de promedios horarios ponderados por medio de los valores de referencia que se presentan en la siguiente tabla.

IMECA	calidad del aire	PST *	PM10 *	SO <sub>2</sub> **	NO <sub>2</sub> **	CO **	O <sub>3</sub> **
0-100	satisfact.	275	150	0.13	0.21	13	0.11
101-200	no satisf.	346	350	0.35	0.66	22	0.23
201-300	mala	637	420	0.56	1.10	31	0.35
301-500	muy mala	1000	600	1.00	2.00	50	0.60

\*  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

\*\* ppm

Para evaluar la calidad del aire en la Cd. de México están instaladas una red automática de monitoreo atmosférico y una red manual. la instrumentación y localización de ambas estaciones de monitoreo fueron diseñadas conforme a los lineamientos establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

La red automática de monitoreo atmosférico cuenta actualmente con 32 estaciones distribuidas en la zona Metropolitana, donde se registra durante las 24 horas del día concentraciones de los contaminantes en estado gaseoso (ozono, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno y monóxido de carbono), así como parámetros meteorológicos (velocidad y dirección de viento, humedad relativa y temperatura ambiente).

Por otra parte, la red manual de monitoreo consta de 19 estaciones de monitoreo distribuidas en toda la ciudad, las cuales se encargan de la medición de las partículas suspendidas totales y de las partículas con un diámetro menor a 10 micrómetros.



## OBJETIVOS

A lo largo del presente trabajo se pretenden alcanzar los siguientes puntos:

- Presentar un panorama general de la contaminación atmosférica y sus efectos producidos en el cuerpo humano.
- Describir brevemente los diferentes tipos de separadores de partículas existentes en el mercado.
- Desarrollar un sistema para la colección de partículas contaminantes que sea eficiente, sencillo, fácil de operar y de fácil mantenimiento.
- Implementar el dispositivo recolector a sistemas de transporte que utilicen motor Diesel.

# **CAPITULO I**

# EFFECTO DE LAS PARTICULAS SUSPENDIDAS EN EL SER HUMANO

## 1.1 GENERALIDADES

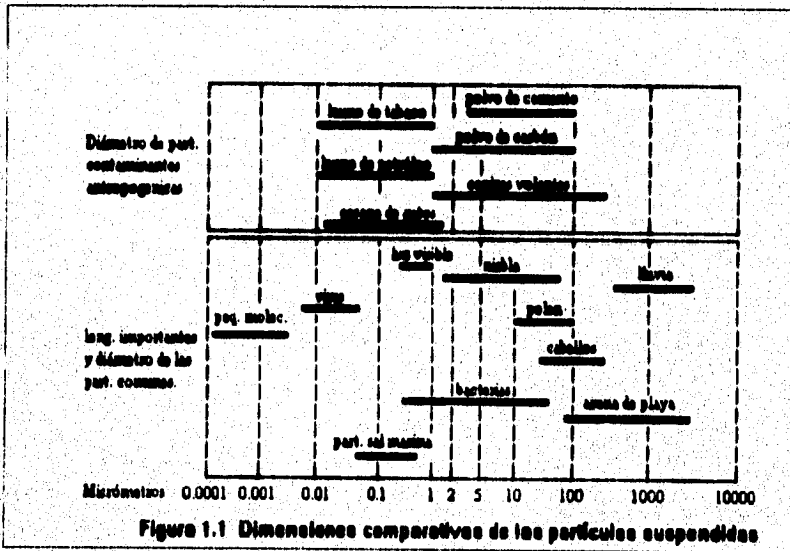
Las partículas son un constituyente natural de la atmósfera, ya que pueden generarse a partir de procesos tan variados como la erosión del suelo ocasionada por el viento, incendios forestales, el desprendimiento del polen de los vegetales hasta las erupciones volcánicas. En el aire se encuentran materiales tanto en estado gaseoso como sólido y líquido. A este tipo de materiales sólidos y líquidos se les conoce en la ciencia de la atmósfera como partículas.

Las partículas suspendidas en el aire tienen muchas formas, desde la esférica hasta las configuraciones más caprichosas e irregulares, sin embargo, se caracterizan por su diámetro equivalente correspondiente a cada forma. Las partículas de interés son aquellas que se mantienen en suspensión en la atmósfera durante periodos relativamente largos. El tiempo en que éstas permanecen suspendidas en el aire dependen principalmente de su tamaño

- Las partículas con un diámetro menor a  $0.1 \mu\text{m}$  se mantienen en suspensión durante periodos muy largos, debido a la interacción de fuerzas moleculares que las mantienen en constante movimiento y flotando en el aire.
- Las partículas con un diámetro entre  $0.1$  y  $20 \mu\text{m}$  tienen una fuerza de sedimentación pequeña comparada con la fuerza del viento que las levanta, por lo que éste las mantiene suspendidas.
- Las partículas con un diámetro mayor a  $20 \mu\text{m}$ , tienen velocidades de sedimentación relativamente grandes, por lo que se eliminan rápidamente por gravedad y otros procesos de inercia.

El tamaño de las partículas es de suma importancia debido a las consecuencias que pueden tenerse, esto es, partículas con un diámetro mayor a  $10 \mu\text{m}$  no penetran más allá de la nariz ya que quedan atrapadas en las estructuras nasales filtrantes. Partículas con un diámetro menor a  $10 \mu\text{m}$  son susceptibles de causar efectos en la salud debido a que pueden penetrar las vías respiratorias. Partículas con diámetro menor a  $2.5 \mu\text{m}$  indican que son producto de reacciones químicas y procesos físicos, este tipo de partículas son las causantes de los efectos en la salud.

El esquema mostrado en la figura 1.1 muestra las dimensiones comparativas de las partículas suspendidas contaminantes producto de reacciones fisicoquímicas y las partículas comunes.



## 1.2 CLASIFICACION DE LAS PARTICULAS

Las partículas se clasifican de la siguiente manera:

### • **PARTICULAS PRIMARIAS**

Son aquellas que se emiten a la atmósfera, producto de causas naturales y sin que exista alguna reacción fisicoquímica, ejemplos:

- Polvos arrastrados por el viento de zonas deforestadas
- Polvos y humos arrojados por actividad volcánica

Por lo general las partículas primarias tiene un diámetro mayor a 2.5  $\mu\text{m}$ .

### • **PARTICULAS SECUNDARIAS**

Son aquellas que se forman en la atmósfera producto de una reacción fisicoquímica con otros compuestos, ejemplos:

- Reacciones químicas de compuestos originalmente en estado gaseoso.
- Condensación de vapores y aglomeración de otras partículas finas.
- Reacciones químicas internas dentro de las propias partículas.

Dentro de las partículas secundarias, encontramos muchos tipos de partículas tales como:

- Sulfatos
- Nitratos
- Carbono Orgánico
- Plomo

**SULFATOS.** - La reacción ocurrida entre el bióxido de azufre y el azufre da como origen al ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que finalmente se transforma en partículas (sulfatos). Solo una pequeña parte de los sulfatos se emiten directamente por la quema de combustóleo y diesel principalmente.

**NITRATOS.** - Existen dos mecanismos que dan como origen a los nitratos:

- Uno de los mecanismos principales es la reacción de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) con radicales de oxidrilo ( $\text{OH}$ ) para producir ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), este a su vez reacciona (en su edo. gaseoso) con las superficies de las partículas atmosféricas para formar nitratos.

- El otro mecanismo se efectúa durante la noche con la reacción de peróxido de dinitrógeno ( $N_2O_2$ ) con aerosoles en fase líquida (el  $N_2O_2$  se forma con la reacción del dióxido de nitrógeno y ozono).

**CARBON ORGANICO.**- Este tipo de partículas se obtiene principalmente por las reacciones del ozono, radicales oxidrilo e ion de nitrato, pero los mecanismos de formación no están bien definidos, así las partículas tanto de origen natural como antropogénicas tienen una gran variedad de reacción y formación de productos.

**PLOMO.**- En el aire el plomo se encuentra en estado sólido, proviene principalmente de los aditivos plomados en la gasolina.

• **PARTICULAS AEROBIOLOGICAS**

En la atmósfera se presentan partículas que mantienen una actividad microbiana, ejemplo, bacterias, hongos, virus y protozoarios, presentándose como células vegetativas o propagulos reproductivos. Debido a su tamaño (1-100  $\mu m$ ), algunas de estas partículas aerobiológicas pueden quedar suspendidas en el aire durante largos periodos. Su importancia radica en el potencial infeccioso y alergeno que depende a la vez de las características del agente patológico, las condiciones ambientales y la resistencia de los posibles huéspedes.

El siguiente esquema ( figura 1.2 ) muestra la distribución por tamaño y origen de las partículas ambientales.

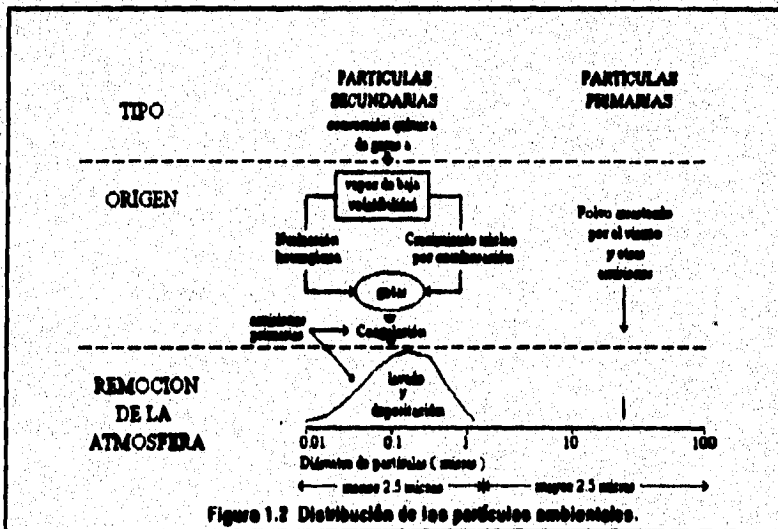
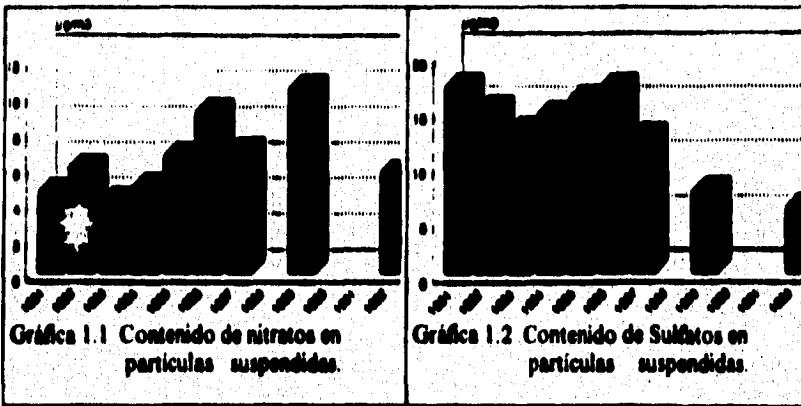


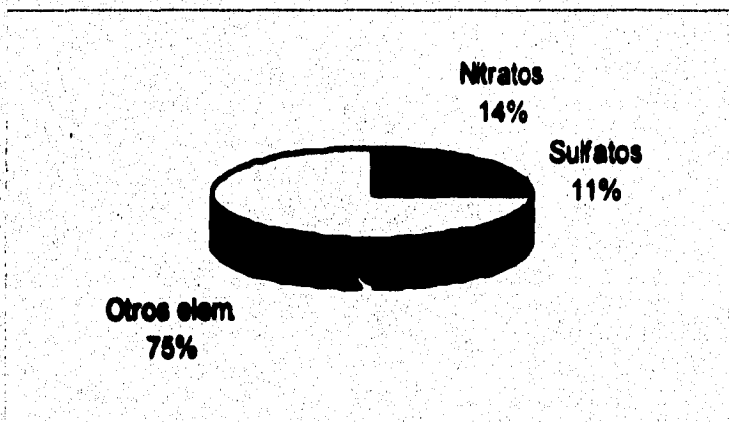
Figura 1.2 Distribución de las partículas ambientales.

### 1.3 ESQUEMATIZACION DE LAS PARTICULAS CONTAMINANTES

Un estudio realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México, muestra el contenido de sulfatos y nitratos ( figuras 1.1 y 1.2 ) tomando muestras en dos puntos de la ciudad (Tacubaya y C.U.).

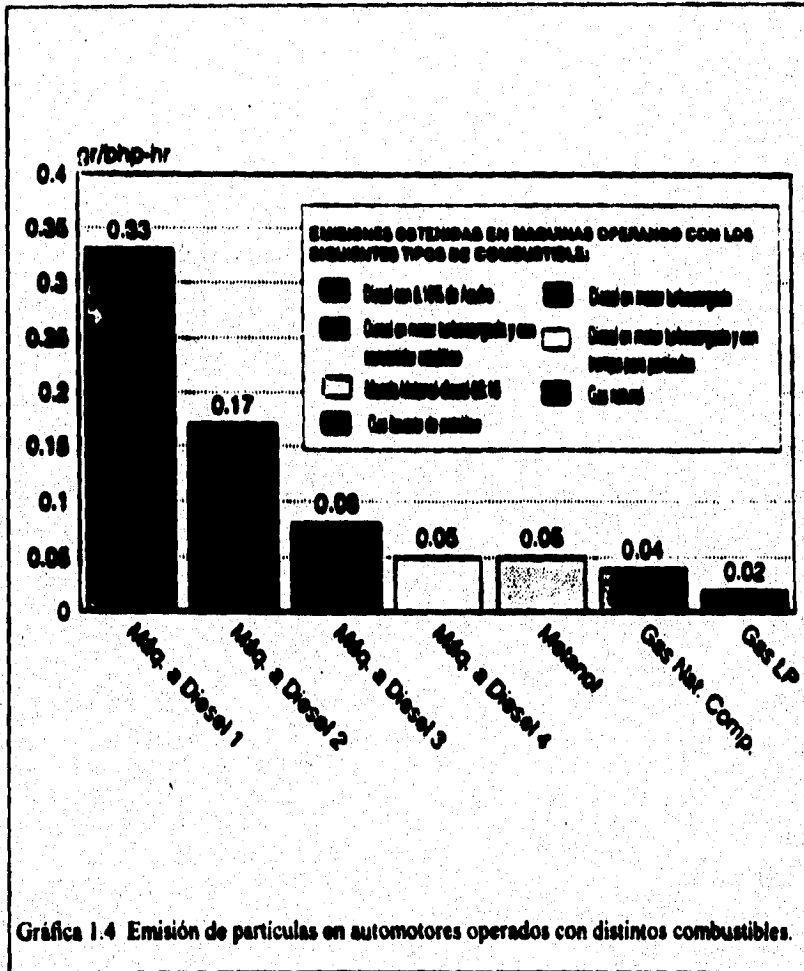


En la gráfica 1.3 se observa el contenido de Sulfatos y Nitratos en partículas suspendidas totales en la zona Suroeste.



Gráfica 1.3 Contenido de sulfatos y nitratos en partículas suspendidas totales.

La gráfica 1.4 muestra un estudio comparativo entre las emisiones de automotores que utilizan gas como combustible y motores a diesel tradicionales y los equipados con la más moderna tecnología en el control de partículas.



Gráfica 1.4 Emisión de partículas en automotores operados con distintos combustibles.



### 1.4 AFECIONES DE LOS DIFERENTES CONTAMINANTES

**MONOXIDO DE CARBONO.**- Al inhalarse el CO interfiere con el transporte de oxígeno (O2) a los tejidos, porque la hemoglobina tiene una afinidad 200 veces mayor por el CO que por el O2. De esta manera, el CO reacciona con la hemoglobina formando carboxihemoglobina (COHb), lo cual limita la distribución de oxígeno al cuerpo.

**OXIDOS DE NITROGENO.**- El bióxido de nitrógeno puede ser fatal a concentraciones elevadas. A menores niveles, pero todavía mayores que los que se respiran en el aire ambiental, irritan los pulmones, causan la bronquitis y neumonía, y provoca disminución de la resistencia a infecciones respiratorias, por ejemplo la influenza.

**HIROCARBUROS.**- Existen evidencias de que algunos hidrocarburos carcinógenos se forman durante la combustión incompleta de casi todas las clases de materiales orgánicos, incluyendo grasas, café, azúcar, corcho, humo del cigarro y la ceniza de los humos de escape.

Su importancia estriba en su contribución a la formación del ozono y, por lo tanto, a sus efectos. Además, ciertos hidrocarburos cíclicos aromáticos presentes en las gasolinas de alto octano, como el benceno, resultan altamente tóxicos. A partir de estudios de salud ocupacional, se sabe que el benceno es un importante cancerígeno.

**BIOXIDO DE AZUFRE.**- El bióxido de azufre es un irritante respiratorio muy soluble, ello provoca que la mayor parte que se inhala se absorba por la nariz y las vías respiratorias superiores; como consecuencia muy escasa cantidad llega a los pulmones. Cuando las concentraciones tanto de partículas en suspensión, como de óxido de azufre pasan de 500 µg/m<sup>3</sup> durante 24 hrs. El aumento se deja sentir sobre todo en los grupos vulnerables de la población, especialmente en los individuos con problemas cardiacos o pulmonares.

Tabla 1.1. Efectos a la salud por la exposición combinada de SO<sub>2</sub> y PST

Concentraciones de:		Efectos
SO <sub>2</sub>	PST	
0.91 ppm (prom. diario)	500 µg/m <sup>3</sup> (prom. diario)	Aumento de mortalidad y de las hospitalizaciones.
0.09-0.10 ppm (media arit. anual)	250 µg/m <sup>3</sup> (prom. diario)	Empeoramiento de enfermedades pulmonares.
0.04 ppm (m.a.s.)	250 µg/m <sup>3</sup> (m.a.s.)	Síntomas respiratorios.
0.03 ppm (m.a.s.)	100 µg/m <sup>3</sup> (m.a.s.)	Efectos sobre la visibilidad

Las tablas 1.1 y 1.2 muestran los efectos del Dióxido de azufre sobre la salud humana.

Tabla 1.2 Efectos del dióxido de azufre sobre la salud humana.

Concentración (ppm)	Tiempo de exposición	Efectos
0.15-0.25	1-4 días	Respuestas cardiorrespiratorias.
1.0-2.0	3-10 min.	Respuesta cardiorrespiratoria en individuos sanos.
5.0	1 hora	Sofocamiento e incremento de resistencia en los pulmones.
10.0	1 hora	Peligro severo, algunas hemorragias nasales.

La tabla 1.3 muestra la tasa de morbilidad y mortalidad en exceso por partículas suspendidas totales.

Efectos:	Zona S.O.	Zona N.O.	Total
Mortalidad total ( miles/5 años )	0.61	5.0	5.61
Tos crónica en niños ( millones/5 años )	0.04	0.31	0.35
DPAR en adultos ( miles días/5 años )	348.68	85.93	434.60
Bronquitis crónica en ancianos ( miles )	2.7	16.8	19.3

**PARTICULAS FINAS.**- La contaminación por partículas finas puede causar el deterioro de la función respiratoria en el corto plazo. En el largo plazo contribuye a enfermedades crónicas, cáncer y a la muerte prematura. Las partículas finas conocidas como PM10 (de tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$ ), son especialmente nocivas porque pueden penetrar a las cavidades pulmonares sin ser captadas por la acción de limpieza natural del sistema respiratorio. El siguiente grupo de personas son más sensibles a los efectos de las partículas finas:

- Personas con influenza, enfermedades crónicas respiratorias y cardiovasculares y ancianos.
- Niños.
- Otros grupos considerados sensibles son los fumadores y las personas que tienen problemas para respirar por la nariz.

## 1.5 EFECTOS A LA SALUD

Los efectos de la contaminación del aire pueden variar desde la simple irritación transitoria hasta enfermedades agudas o incluso la muerte, en función de la magnitud de los niveles de concentración y de los periodos de exposición de la población afectada.

Los efectos de las partículas contaminantes se manifiestan en órganos específicos tales como:

- Ojos
- Piel
- Sistema Nervioso
- Sistema Respiratorio
- Sistema Cardiovascular
- Sistema Gastrointestinal
- Sistema Reproductivo

Los contaminantes tienen efectos en la salud, por contacto directo o indirecto.

**Contacto Directo.**- los contaminantes están en íntimo contacto con los órganos expuestos (ojos, piel y sistema respiratorio).

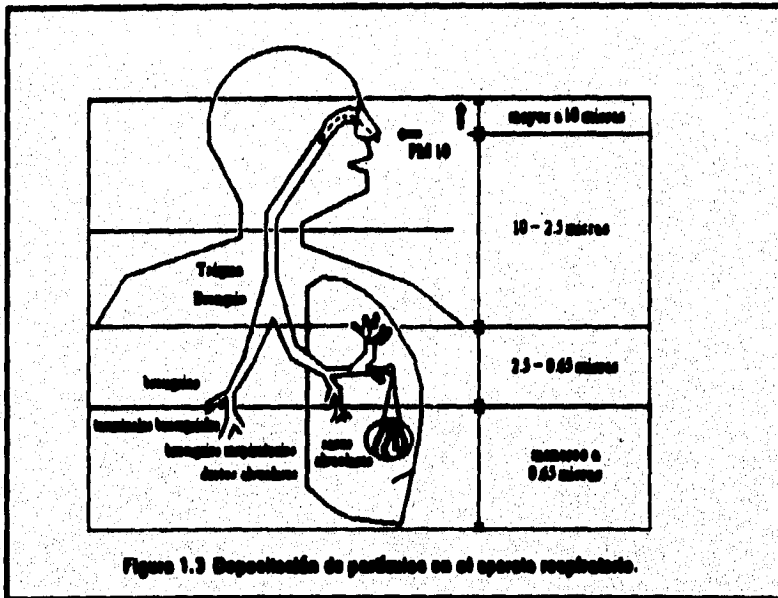
**Contacto Indirecto.**- Los contaminantes entran por la corriente sanguínea desde los pulmones o por el sistema gastrointestinal (sistemas reproductivo, cardiovascular, nervioso y gastrointestinal).

Las partículas con un diámetro mayor a  $10 \mu\text{m}$  son filtradas por medio de la nariz, pero las que cuentan con un diámetro menor a  $10 \mu\text{m}$  pueden depositarse a lo largo de los conductos respiratorios y solo una parte de éstas son evacuadas y eliminadas por el organismo, mientras que el resto se introducen en los pulmones y tejidos sensibles, ocasionando efectos nocivos para la salud.

Una vez que las partículas contaminantes pasan los mecanismos de defensa del cuerpo humano, ya sea por contacto directo o indirecto, provocan enfermedades que pueden conducir a la muerte de la persona, tales enfermedades son:

- Irritación de los ojos.
- Efecto en sistema cardiovascular.
- Bronquitis crónica.
- Enfisema pulmonar.
- Cáncer pulmonar.
- Asma bronquial.
- Enfermedades respiratorias.

La figura 1.3 muestra el diagrama esquemático que presenta la configuración del aparato respiratorio humano, donde se señalan las zonas y órganos que lo integran, así como las áreas donde pueden depositarse las partículas inhaladas.



**IRRITACION DE LOS OJOS.**- Es una de las manifestaciones más frecuentes de los contaminantes en el cuerpo humano. Frecuentemente asociado con exposiciones por oxidantes fotoquímicos y aldehídos. La irritación de los ojos es consecuencia de que los oxidantes son aproximadamente 0.1-0.15 ppm. y se incrementa con el aumento de concentraciones de  $\text{NO}_2$ . La irritación de los ojos desaparece rápidamente después de que la exposición ha cesado.

**EFFECTOS EN SISTEMA CARDIOVASCULAR.**- Los contaminantes como el CO son absorbidos en la corriente sanguínea y puede tener efectos directos e indirectos en sistema cardiovascular.

Las enfermedades cardiovasculares pueden ser resultado de los efectos indirectos de otras enfermedades por aire contaminado. Por ejemplo, algunas personas con enfermedades respiratorias, tienen afecciones al corazón por el stress y pueden llegar hasta una enfermedad crónica respiratoria.

**BRONQUITIS CRONICA.**- La bronquitis es una enfermedad respiratoria caracterizada por una inflamación de la membrana de recubrimiento en la vía de aire bronquial. La bronquitis puede ser causada por infecciones patogénicas o por irritaciones respiratorias las cuales pueden ocurrir por fumar cigarro, exposiciones industriales o ambientales y contacto de aire contaminado.

Cuando la inflamación bronquial persiste por tres meses o más, se clasifica como bronquitis crónica. La causa primordial de la bronquitis crónica es una mayor irritación en la membrana bronquial. La bronquitis crónica es caracterizada por una persistente tos y una excesiva producción de moco y saliva. Frecuentemente acompañada por la destrucción de la cilia y engrosamiento el epithelium bronquial. La bronquitis crónica tiene un efecto significativo en las funciones respiratorias, así se presenta una resistencia a la vía de aire incrementada por una oclusión.

**ENFISEMA PULMONAR.**- La bronquitis crónica es una enfermedad la cual afecta la porción superior del sistema pulmonar con mayor profundidad, en donde el tejido de los pulmones que normalmente facilita la exposición de gases con la sangre no cumple con dichas funciones.

El enfisema frecuentemente es una enfermedad de personas con edad avanzada, es caracterizada por una destrucción o degeneración de las paredes de los sacos alveolares. Como consecuencia el área de superficie de los tejidos pulmonares es reducido, disminuyéndose la areación de la sangre.

**CANCER PULMONAR.** - El cáncer pulmonar es usualmente una enfermedad que afecta a personas de edad madura o avanzada, se produce por una exposición prolongada de agentes cancerígenos y el desarrollo del síndrome de ésta. Tiene un período de latencia de aproximadamente 30 años o más, con una incidencia a una edad de 50 años. Durante el período de latencia entre la exposición inicial al agente cancerígeno y la enfermedad, el individuo puede sufrir cambios en su conducta.

La forma más común del cáncer pulmonar es originada en la membrana bronquial que invade al árbol de tejidos bronquiales y puede extenderse al resto de los pulmones y eventualmente a otras partes del cuerpo. Esta enfermedad se relaciona con exposiciones a asbestos, arsénico, gases radioactivos y polvos.

**ASMA BRONQUIAL.** - El asma bronquial puede ser producido por una variedad de causas, como la exposición a gases irritantes y partículas suspendidas en el aire, incluyendo las reacciones alérgicas. Es producto de una gran variedad de contaminantes atmosféricos como el ozono, dióxido de azufre, formaldehídos, etc.

Es una reacción respiratoria que se presenta en los bronquios, caracterizado por una disminución en las vías respiratorias, inflamación en las vías respiratorias, excesiva mucosidad, etc.

# **CAPITULO II**

# EQUIPOS PARA ELIMINACION DE PARTICULAS

## 2.1 GENERALIDADES

Las partículas suspendidas varían mucho en cuanto a su tamaño, peso, forma, composición química, peso específico, volumen, densidad aparente, adherencia, resistividad, humectabilidad, corrosividad, etcétera. En los equipos para la eliminación de partículas tienen que considerarse los gases a limpiar y los materiales suspendidos en los gases de escape.

Gases a limpiar:

- Temperatura
- Composición química del gas

Material suspendido en el gas:

- Si es sólido o líquido
- Viscosidad del líquido a la temp. del gas
- Propiedades abrasivas y de fluencia del polvo
- Tamaño y forma de las partículas suspendidas
- Composición química del polvo
- Resistividad eléctrica (precipitador eléc.)

Los siguientes principios fundamentales rigen a todos los colectores de partículas:

- 1.- Todos los colectores limpian el gas eliminando continuamente el polvo de una corriente en movimiento.
- 2.- El tamaño del colector y su costo son directamente proporcionales a la cantidad de gases que se tienen que limpiar.
- 3.- La eficiencia de recolección se calcula de la siguiente manera:  

$$\eta = (W_{\text{polvo entrante}} - W_{\text{polvo que sale}}) / (W_{\text{polvo entrante}})$$
- 4.- Para todos los tipos de colectores de partículas el polvo fino es más difícil separar que el grueso.

Por su funcionamiento los separadores de partículas se clasifican en 5 grupos:

- 1.- COLECTORES MECANICOS.
- 2.- COLECTORES POR FILTRACION A TRAVES DE UN MEDIO POROSO.
- 3.- LAVADORES Y ABSORBEDORES POR VIA HUMEDA.



#### 4.- PRECIPITADORES ELECTRICOS.

#### 5.- AGLOMERADORES SONICOS.

### 2.3 COLECTORES MECANICOS

Estos aparatos aprovechan la diferencia de pesos específicos existentes entre los polvos y el gas para efectuar la separación de los mismos.

Son muy utilizados en la industria por tener las siguientes ventajas:

- Bajo costo de instalación
- Bajo gasto de energía
- Bajo costo de mantenimiento
- Excelente confiabilidad

Aunque la desventaja de este tipo de aparatos radica en su eficiencia de recolección de partículas, ya que en la mayoría de los casos la eficiencia es baja, mientras que otros es muy buena (ciclón con eductor de partículas finas).

Entre los colectores mecánicos más importantes se encuentran:

#### 1.- CAMARA DE SEDIMENTACION POR GRAVEDAD.

#### 2.- COLECTOR CON DESVIADOR DE FLUJO.

#### 3.- COLECTOR CELULAR DE BAJA PERDIDA DE PRESION.

#### 4.- COLECTOR CICLONICO:

- a) Ciclón axial de placas y diámetro pequeño.
- b) Ciclón de diámetro grande con entrada enrollada.
- c) Ciclón de diámetro grande con entrada enrollada y eductor para partículas muy finas.

### 3.2.1 CAMARA DE SEDIMENTACION POR GRAVEDAD

Este colector disminuye la velocidad de la corriente capaz de transportar el polvo a un área de asentamiento del mismo, durante un periodo suficiente de tiempo para que el polvo más pesado pueda depositarse por efecto de la gravedad en las tolvas, donde se extrae periódicamente. La única desventaja de este tipo de aparatos es su eficiencia muy baja para coleccionar polvos finos o moderadamente finos.

Su principio de funcionamiento se basa en el hecho de que las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas caen por efecto de la gravedad, a una velocidad que depende del tamaño de las partículas, su densidad y forma, la densidad y viscosidad del gas. La partícula alcanza rápidamente una velocidad constante expresada como velocidad de caída libre o terminal.

La figura 2.1 muestra una cámara de sedimentación por gravedad, donde el gas se expande uniformemente para llenar la cámara de gas. Por debajo de la cámara se hallan las tolvas en las que cae el polvo cuando abandona la corriente gaseosa; no existe flujo en estas tolvas, y, por lo tanto, tras haber caído el polvo por debajo del nivel de las mismas, queda retenido en la cámara de sedimentación.

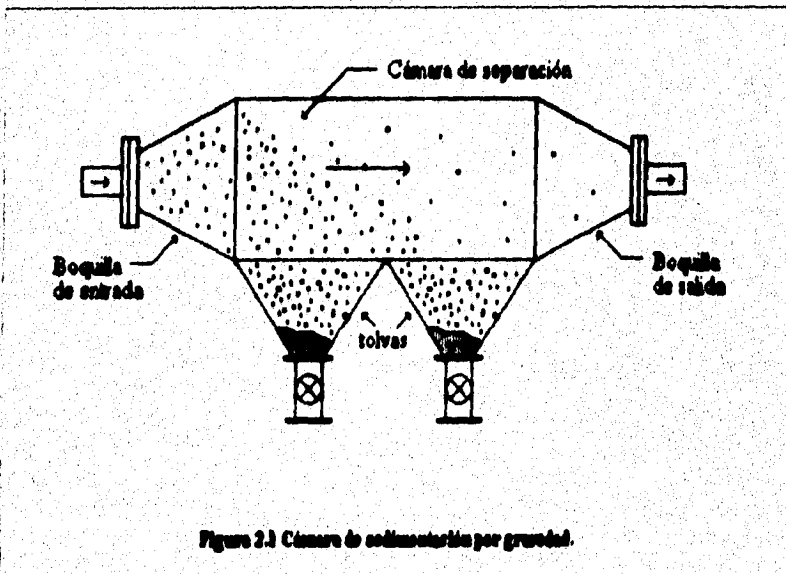


Figura 2.1 Cámara de sedimentación por gravedad.

### 2.2.2 COLECTOR DE RECIRCULACION CON DESVIADOR DEL FLUJO

En este colector ( figura 2.2 ) el gas que se va a limpiar se introduce a alta velocidad por debajo de un desviador horizontal hecho de varillas separadas entre sí. Para pasar por estos intersticios y llegar a la salida del aire limpio, la corriente de aire sucio tiene que dar una vuelta a gran velocidad. El peso específico bajo del gas le permite dar esa vuelta con facilidad. El polvo, por ser más pesado, arrastrado por la inercia, no puede dar esa vuelta brusca y es detenido por debajo de la placa desviadora hasta que es capturado por la abertura para polvo. Al expandirse esta abertura, el polvo circula a menor velocidad y el polvo cae por la ranura de polvo sobre la tolva de colector en la que sedimenta como en la cámara de sedimentación. El flujo circulante se controla a una velocidad nominal con la ranura del polvo que se puede abrir más o menos y por el desviador de la corriente circulante.

Entre las grandes desventajas que presenta este colector mecánico es su baja eficiencia de recolección de partículas, que aunque es mucho mayor que la de la cámara de sedimentación, no es suficiente para cumplir los reglamentos actuales de control de emisiones excepto como un dispositivo predepurador, para utilizar posteriormente un dispositivo más eficiente.

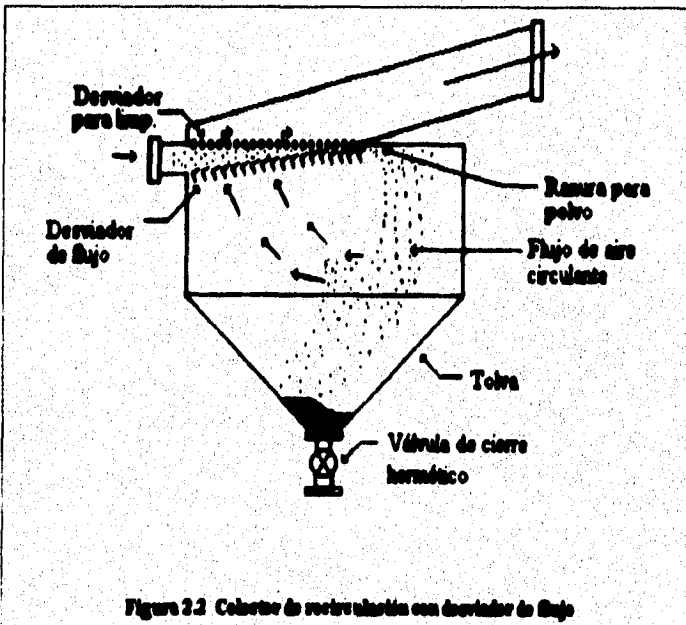
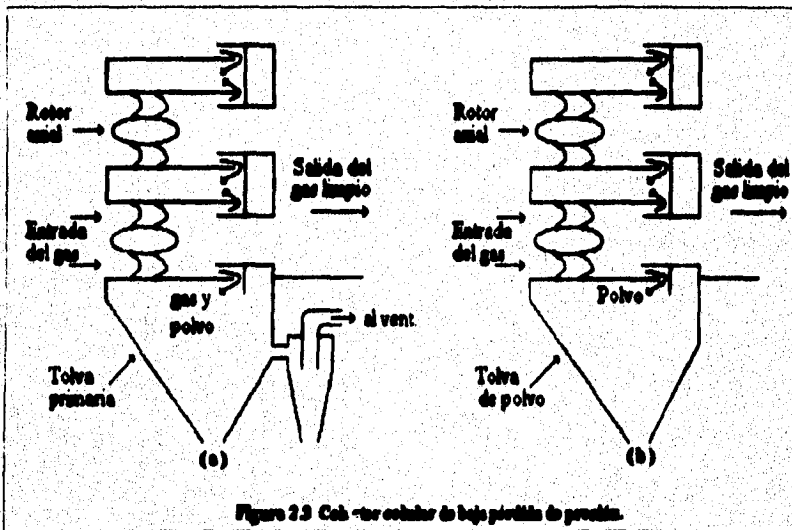


Figura 2.2 Colector de recirculación con desviador de flujo

### 2.2.3 COLECTOR CELULAR DE BAJA PÉRDIDA DE PRESIÓN

Están constituidos por un gran número de células de separación dispuestas en paralelo, y cada célula consta de un cilindro de unos 30 cm. de diámetro, con un rotor fijo en la entrada de la célula que obliga al gas a girar, como consecuencia del giro, la mayor parte del polvo se concentra en la capa exterior del gas.

En la figura 2.3 se muestran dos tipos de colectores celulares de baja pérdida de presión. En el tipo (a), la capa exterior que constituye aproximadamente el 10% del volumen total del gas, se extrae junto con el polvo que contiene y se somete a tratamiento de ciclones secundarios muy eficaces. La columna central del gas, que sólo alberga una pequeña cantidad de polvo residual, pasa directamente al conducto del gas limpio. El gas procedente del ciclón de alta eficacia se retroalimenta en el sistema de gas limpio que sigue al tratamiento. En el tipo (b), no se extrae gas en el sistema secundario, y se separa el polvo únicamente por inercia.



### 2.2.4 COLECTORES CICLONICOS

Separan la materia particulada del gas que la transporta, transformando la velocidad de la corriente que entra en un remolino exterior descendente y otro remolino interior ascendente, ambos en el interior del cilindro superior y cono inferior del ciclón. El remolino descendente que gira a gran velocidad envía por fuerza centrífuga el polvo por ser más pesado, contra las paredes del ciclón y lo lanza en el interior de la tolva de la cual se extrae periódicamente. El remolino ascendente de gas limpio que procede en toda su longitud de la parte interna del remolino descendente, abandona el ciclón por el tubo telescópico que se encuentra en la parte superior del cilindro.

El patrón de flujo en el interior del ciclón puede ser sencillo o complejo de acuerdo con muchas variables: el tipo de entrada, las proporciones dimensionales y la inclusión o exclusión de un eductor para partículas muy finas o la interposición de placas desviadoras.

No es posible predecir, a partir de consideraciones puramente teóricas, las curvas eficiencia-tamaño de la partícula para diferentes tipos y diseños de ciclones. Sin embargo, para ciclones de determinado diseño, pueden calcularse con razonable precisión los efectos de las variaciones del tamaño del ciclón, carga del gas y las características del polvo y gas, tras haber establecido los datos básicos de diseño para ciertos polvos seleccionados.

#### FACTORES IMPORTANTES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LOS CICLONES:

- 1.- Diámetro del ciclón. La eficiencia de reunión del polvo aumentará a medida que disminuya el diámetro del ciclón, es decir, el diámetro de la partícula de polvo influye en la eficiencia de recolección, así como el diámetro del ciclón.
- 2.- Capacidad del ciclón. La eficiencia de recolección de polvo aumenta directamente con la velocidad del gas de entrada, que es una medida de la capacidad del ciclón, es decir la eficiencia se incrementa a medida que aumentan la velocidad de entrada y capacidad del ciclón.
- 3.- Temperatura del gas. Puesto que la viscosidad del gas aumenta conforme se incrementa su temperatura, disminuye, por lo tanto, la velocidad de separación de las partículas. Esto reduce la eficiencia de separación de polvo.
- 4.- Rugosidad del cuerpo del ciclón. Al aumentar la turbulencia de la columna de giro de gas, disminuye la eficiencia.

**5.- Concentraciones de polvo pesado. La eficiencia del ciclón tiende a ser constante o incluso aumenta, y se reduce ligeramente la pérdida de presión.**

Debido a su sencillez, confiabilidad y gran eficiencia, el colector ciclónico de partículas se ha usado mucho en todo el mundo durante los últimos cien años. Existen tres tipos de colectores de ciclón:

- 1. CICLON AXIAL DE PLACAS DE DIAMETRO PEQUEÑO.**
- 2. CICLON DE DIAMETRO GRANDE CON ENTRADA ENROLLADA.**
- 3. CICLON DE DIAMETRO GRANDE CON ENTRADA ENROLLADA Y EDUCTOR DE PARTICULAS FINAS.**

## COLECTOR CICLÓNICO AXIAL DE PLACAS DE DIAMETRO PEQUEÑO

En este dispositivo (figura 2.4), el gas penetra a una cámara de gas sucio, de donde se alimenta al ciclón. Las placas interpuestas impulsan el giro ciclónico creando un remolino descendente externo, que provoca una fuerza centrífuga impulsora del polvo contra las paredes del cilindro, hasta que es expulsado por la salida del polvo a la tolva de almacenamiento.

**Ventajas.** - La ausencia de partes móviles contribuye a su extrema sencillez y buena calidad. Su gran capacidad, tamaño relativamente pequeño y ahorro de gastos de tubos estandarizados, se combinan para hacer de este tipo el más económico de todos los ciclones de gran eficiencia.

**Desventajas.** - Las placas interpuestas están sometidas al desgaste por erosión que puede ser importante cuando se trata de polvos tocos de características abrasivas, incluyendo partículas de textura gruesa y alto peso específico. El tamaño relativamente pequeño de las aberturas existentes entre las placas provoca un acumulamiento de polvo que tenga características inherentes a adherirse en dichas placas.

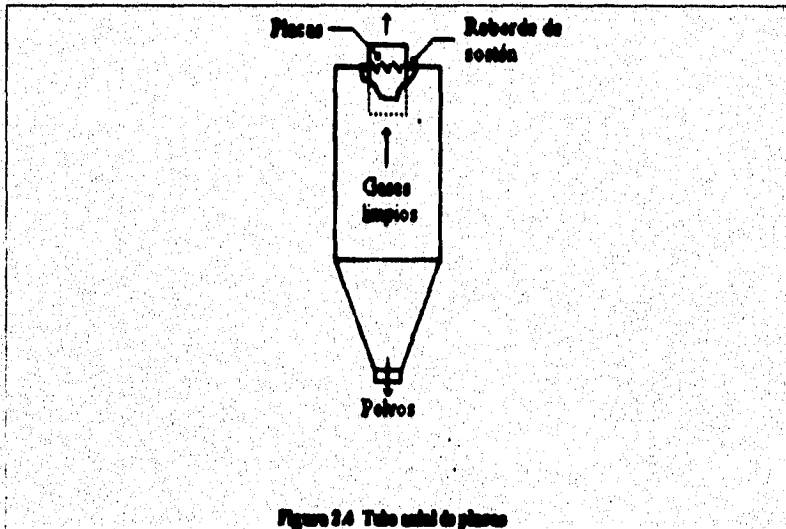


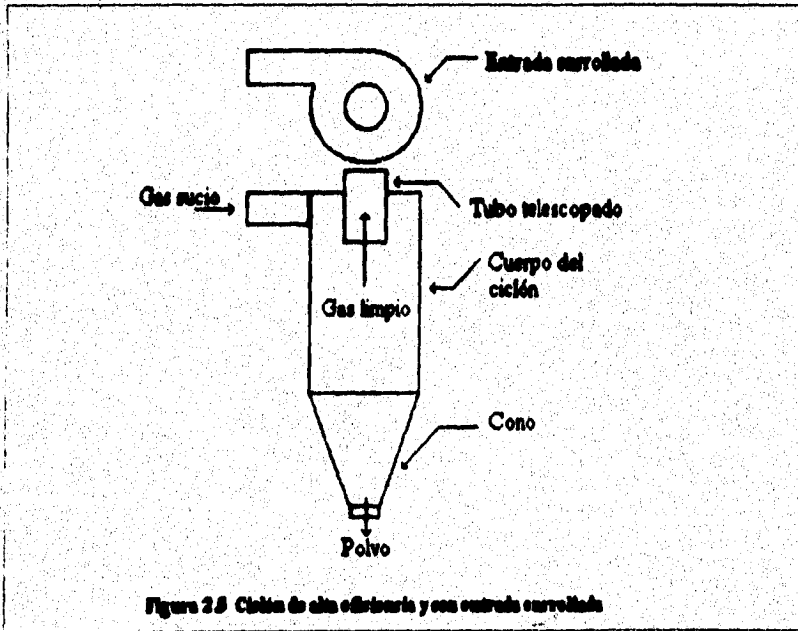
Figura 2.4 Tubo axial de placas

## COLECTOR CICLONICO DE GRAN DIAMETRO CON ENTRADA ENROLLADA

Estos dispositivos (figura 2.5) captan los gases sucios en la boquilla rectangular enrollada de entrada, tiene la pared del lado derecho tangente al cilindro y se combina gradualmente con el cilindro formando una vuelta completa de 180°. Esta característica asegura que el cilindro sea de un diámetro completamente eficaz en toda su longitud, inclusive en la entrada opuesta a la entrada, permitiendo así al gas y al polvo separarse, al formar los remolinos descendente y ascendente sin necesidad de placas o de un techo hundido. El remolino descendente se forma con un mínimo de turbulencia, lo cual facilita la precipitación del polvo bajo la influencia de la fuerza centrífuga en las paredes del cilindro y cono.

**Ventajas.** - La ausencia de partes móviles influye en su extrema sencillez y confiabilidad. La suavidad de las partes internas y la ausencia de placas suprime el desgaste por choque directo y reduce al mínimo la turbulencia, haciendo que también disminuya al mínimo el desgaste por fricción de deslizamiento y eliminando la formación de conglomerados de polvo y la obturación.

**Desventajas.** - El costo y tamaño del ciclón aumentan de acuerdo a su eficiencia.





## COLECTOR CICLONICO DE GRAN DIAMETRO CON ENTRADA ENROLLADA Y EDUCTOR DE PARTICULAS FINAS.

Es un aparato (figura 2.6) donde el patrón de flujo es semejante al del ciclón estándar de entrada de enrollamiento, excepto que se añade un eductor de partículas finas en la parte superior del cilindro para eliminar continuamente las partículas de polvo más finas que tienden a ser atrapadas por el remolino superior. Estas partículas se eliminan del cilindro y son transportadas por un conducto de derivación en espiral al inyector de partículas finas, donde se combinan con las más gruesas en el nivel donde se unen el cilindro y el cono.

Esta característica mejora la eficiencia colectora sin aumentar la pérdida de carga. La eficiencia es mejor por dos razones: a) La adición del remolino superior equilibra el remolino inferior de modo que se uniforma el patrón de flujo interno. b) Al eliminar las partículas finas de la parte superior del cilindro y reinyectarlas en la corriente de las más gruesas, aumenta su captura y evita un acarreo posterior.

**Ventajas.** - Tiene todas las ventajas descritas en el ciclón de enrollamiento, además de una mayor eficiencia de recolección sin que haya ningún aumento en la pérdida de carga.

**Desventajas.** - La adición del eductor de partículas muy finas aumenta el costo de instalación en un 10%.

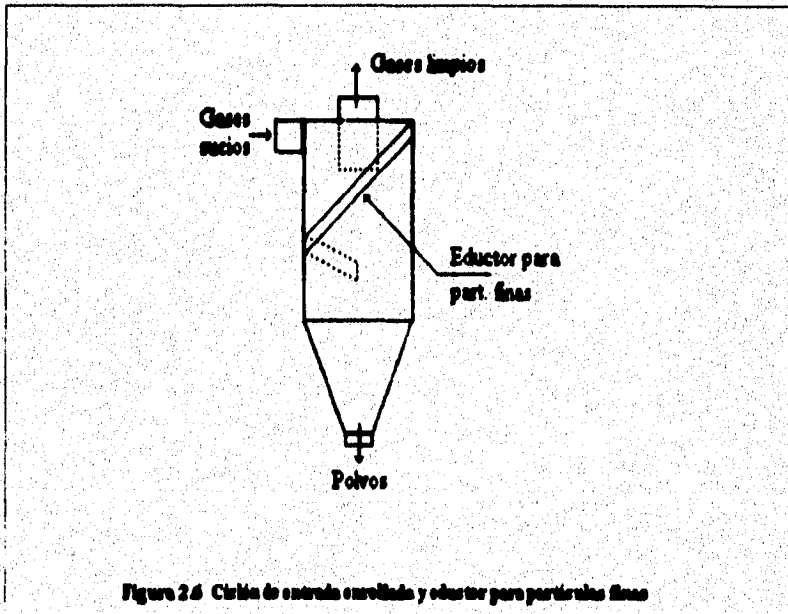


Figura 2.6 Ciclón de entrada enrollada y eductor para partículas finas

## 2.3 COLECTORES POR FILTRACION A TRAVES DE UN MEDIO POROSO

Es el tipo de colector con mayor aplicación para la eliminación de partículas secas y sólidas. Se basa en el principio de hacer pasar los gases cargados de polvo a través de un medio filtrante poroso donde queda atrapado el polvo. Los medios filtrantes se agrupan en:

- Lechos de grava o arena.
- Papel poroso o estelas fibrosas.
- Filtros de tela o fieltros

El proceso de filtración se efectúa de la siguiente manera:

- 1.- Las partículas se separan debido al tamizado del medio filtrante.
- 2.- Las partículas se separan por la inercia.
- 3.- Las partículas muy finas pueden depositarse por la acción de una carga electrostática sobre el polvo.
- 4.- Las partículas muy finas en la región submicroscópica, de peso similar al de las moléculas del gas portador, siguen las líneas de flujo del gas y no se separan por efecto de la inercia.
- 5.- Las partículas de tamaño más pequeño que los poros del filtro quedan retenidas debido a la acumulación de una capa de polvo sobre el material filtrante y en su interior.

**Ventajas.** - Son equipos muy eficientes, pueden alcanzar una eficiencia de recolección de partículas del 99%.

**Desventajas.** - Son aparatos costosos y de alto costo de mantenimiento.

Entre los equipos que utilizan este sistema se encuentran los siguientes:

- 1.- FILTROS DE PAPEL.
- 2.- FILTROS DE TELA.
- 3.- LECHOS DE PARTICULAS AGREGADAS.

### 3.3.1 FILTROS DE PAPEL

Utilizan un papel poroso como medio filtrante. El filtro permanece en servicio hasta que, por la acumulación de polvo, aumenta la pérdida de presión hasta un punto en el que pasa insuficiente gas o la pérdida de presión es demasiado alta, y entonces se reemplaza el elemento filtrante ( Figura 2.7 ).

**Ventajas.** - Pueden separar partículas inferiores a  $1\mu\text{m}$  , incluso bacterias.

**Desventajas:**

- Operan a bajas temperaturas del gas.
- Operan con bajos flujos volumétricos del gas.
- El papel poroso tiene bajas propiedades mecánicas.

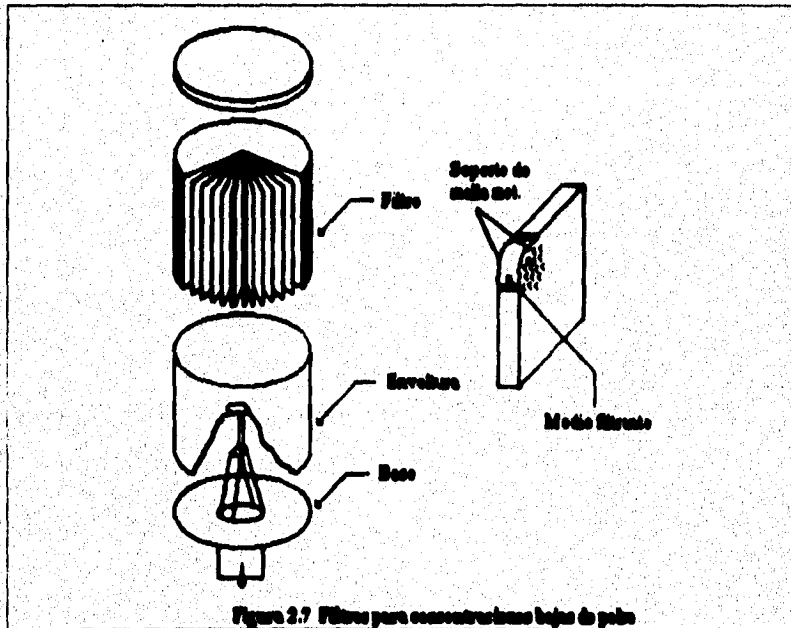


Figura 2.7 Filtros para concentraciones bajas de polvo

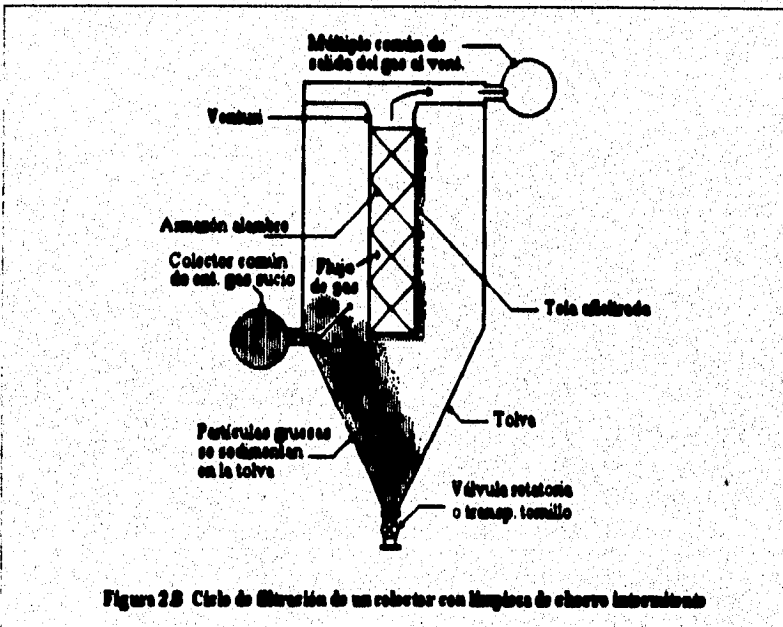
### 3.3.2 FILTROS DE TELA

Con el filtro de tela se pueden tratar grandes volúmenes de gas con muy altas concentraciones de polvo, correspondientes a cualquier proceso y sobre una base continua. Sólo los restringe la eficacia del sistema de limpieza incorporado y las propiedades de la tela. El medio filtrante está formado por materiales de tela de algodón o fieltro, manufacturados a partir de fibras naturales o sintéticas ( figura 2.8 ).

Aunque los filtros de materiales tejidos son de géneros muy diferentes todos funcionan atrapando el polvo en el lado de la tela por donde llegan los gases sucios, permitiendo al gas que pase por los intersticios entre las hebras tejidas de la tela. La capacidad del filtro para recoger polvo fino es el resultado directo de la aglomeración de una capa frágil y porosa de polvo en el lado de la tela por donde entra el aire sucio. Esta capa, denominada torta de filtro, bloquea los intersticios más grandes y atrapa a las partículas más finas.

**Ventajas** - Son muy eficientes a diferentes cargas, desde la máxima hasta el flujo nulo de gas.

**Desventajas** - Son de gran tamaño y alto costo de mantenimiento. Cuando operan a bajas temperaturas del gas existe la obturación del tejido debido a la humedad, cuando funcionan por debajo del punto de rocío.



De la infinita variedad de filtros de tela, los siguientes son los que tienen una mayor aplicación comercial:

- 1.- Cámara intermitente de filtros con limpieza a mano o por aplicación de energía.
- 2.- Cámara de filtros convencional automática con agitación mecánica.
- 3.- Limpieza automática por flujo invertido de aire.
- 4.- Limpieza por chorro de agua, de corriente invertida
- 5.- Limpieza automática por chorro intermitente invertido.

### **2.2.3 LECHOS DE PARTICULAS AGREGADAS**

Los filtros de lechos de partículas agregadas están formados por partículas de tamaño uniforme, de materiales minerales tales como arena o grava. Se utilizan estos filtros en diversas disposiciones; cuando las concentraciones de polvo son bajas, el lecho es fijo y se limpia periódicamente el medio filtrante. En otros casos, el filtro está colocado en secciones, cada una de las cuales puede aislarse a su vez del flujo de gas. Durante el periodo de parada se somete el lecho a vibración o circulación invertida para eliminar el polvo que ha captado. El polvo captado cae en tolvas situadas debajo del lecho.

Cuando se utiliza este tipo de filtro para gases con altos contenidos de humedad, debe procurarse que las partículas agregadas estén por encima del punto de rocío cuando se introducen los gases cargados de polvo, pues de otro modo el lecho quedaría bloqueado por el polvo húmedo que los métodos de limpieza normales no desalojan. La eficiencia de estos aparatos aumenta cuando disminuye el tamaño de las partículas agregadas y crece con la profundidad del lecho.

**Ventajas.** - Sencillas y facilidad de trabajo a temperaturas elevadas.

**Desventajas.** - Solo es utilizable en procesos donde el contenido de humedad es bajo.

## 2.4 LAVADORES Y ABSORBEDORES POR VIA HUMEDA

Son artefactos que utilizan fases mezcladas de gas y líquido, transfiriendo la materia suspendida en el gas al líquido absorbedor, en donde el gas sale limpio hacia el proceso al cual ha de utilizarse posteriormente.

El principio de operación de este tipo de aparatos se basa en la colisión entre partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas. La colisión y la coalescencia resultante se provocan mediante:

- Efectos de la inercia y de la gravedad.
- Efecto electrostático.
- Tensiones de difusión
- Numerosos procesos de absorción.

**Ventajas.** - Existe una gran variedad de tipos, que permite una selección adecuada para casi cualquier problema de purificación de gases, con una eficiencia que llega a ser del 99%

**Desventajas.** - Presenta dificultades para deshacerse del cenizo de desechos, tienen un costo elevado de energía, costo de los materiales que intervienen en el servicio cuando hay corrosión química y los problemas potenciales de las boquillas obstruidas, la falta de líquido para lavar que sea lo suficientemente claro y el tratamiento de líquidos lavadores corrosivos.

Existen muchas variedades de lavadores y absorbedores por vía húmeda, según los líquidos utilizados para eliminar el material suspendido, entre los más utilizados se encuentran:

- 1.- TORRE DE PULVERIZACION POR GRAVEDAD.
- 2.- COLECTORES DE PARTICULAS DE CHOQUE.
- 3.- COLECTOR DE CAMARA RELLENA O PULVERIZACION AUTOINDUCIDA.
- 4.- COLECTOR DE ORIFICIO SUMERGIDO.
- 5.- COLECTORES DE ALTA ENERGIA O VENTURI.

### 3.4.1 TORRE DE PULVERIZACION POR GRAVEDAD

Es un colector (figura 2.9) que opera a contracorriente, consiste básicamente en un gran recipiente a través del cual fluye el gas a baja velocidad (relativamente) por el plano vertical. Se introduce el líquido absorbente por el extremo superior de la torre y generalmente circula a contracorriente del gas.

La eficacia de limpieza de este sencillo aparato depende de la cantidad de agua y del tamaño de la gota. La ventaja de este tipo de absorbedor de gas estriba en su bajo consumo de energía, de 2 a 4 cm de agua. Sólo se aconseja para material grueso; la diferencia de presión está relacionada con el diseño y únicamente puede cambiarse variando el caudal de gas que lo atraviesa.

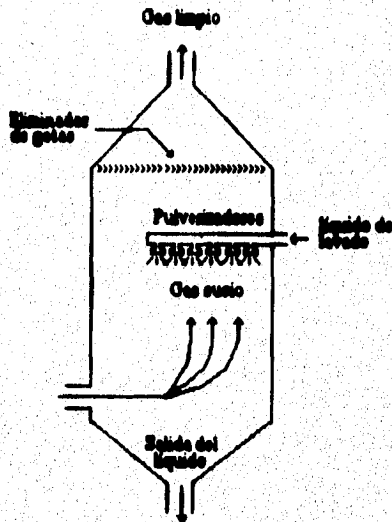


Figura 2.9 Torre de pulverización por gravedad

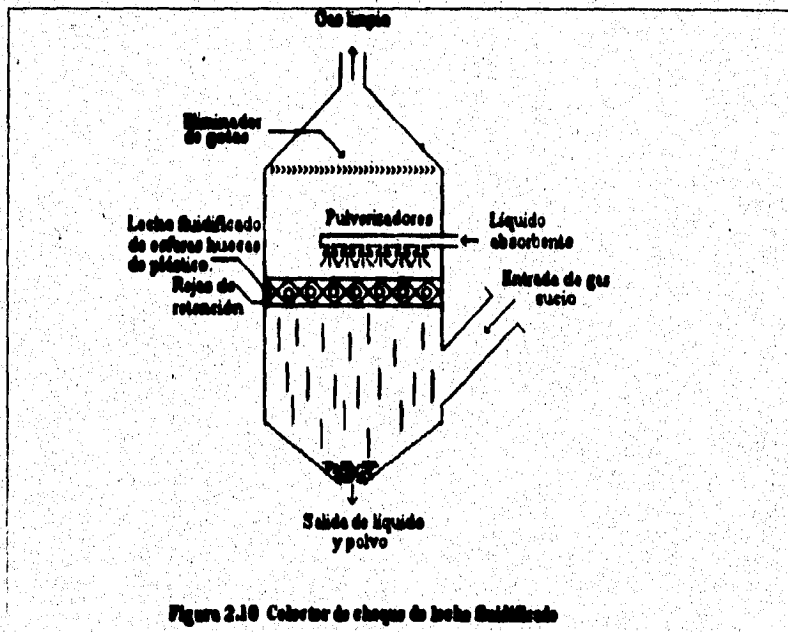


### 2.4.3 COLECTORES DE PARTICULAS DE CHOQUE

El colector de choque o impacto se basa en el mismo principio que los colectores por inercia, donde el gas sucio entra por la base de la torre y circula hacia arriba a través de una cortina descendente de agua, que separa el polvo grueso de una manera similar a como lo efectúa una torre por gravedad ( figura 2.10 ).

Este aparato funciona básicamente por un ciclo, el cual inicia con la provocación de un choque de polvo (previamente humedecido) en la superficie empapada que captura las partículas contaminantes en una película líquida que escurre por ella y que finalmente descarga el polvo fuera del colector en forma de cieno, junto con el líquido de lavado. Existen 2 tipos de colectores de choque:

- 1.- Colector de partículas con desviadores de choque:
  - Lavador de ciclón.
  - Lavador de acción múltiple.
- 2.- Colector de choque con placas desviadoras.



### 3.4.3 COLECTOR DE CÁMARA RELLENA O PULVERIZACIÓN AUTOINDUCIDA

Es un sistema que aprovecha la velocidad y energía del gas para inducir una pulverización a fin de realizar la absorción. Carece de un sistema de pulverización.

El gas sucio se hace pasar de abajo hacia arriba a través de los intersticios tortuosos formados por una capa gruesa o delgada de relleno menudo humedecido por una contracorriente de líquido lavador. Como las rutas del gas y del líquido son opuestas y complicadas y como el área de la superficie húmeda es muy grande hay oportunidades repetidas de que el polvo sea atrapado por una superficie mojada o por el líquido de lavado que desciende ( figura 2.11 ).

Existen varios tipos de colectores de cámara rellena o de pulverización autoinducida, entre los más importantes se encuentran:

- Lavador de gases de capas de relleno fijas.
- Lecho fluido.
- Capa inundada.

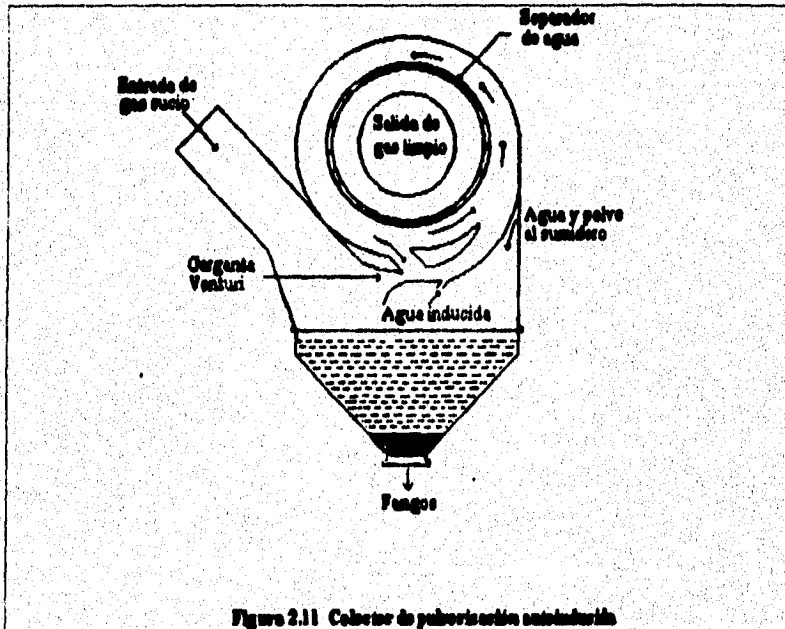


Figura 2.11 Colector de pulverización autoinducida

#### **3.4.4 COLECTOR DE ORIFICIO SUMERGIDO**

Es un sistema donde el gas sucio a alta velocidad, se dirige a través de un pasaje estrecho encima o dentro de un depósito de líquido. se produce así una gran agitación que asegura una mezcla completa del gas y del líquido de lavado. La turbulencia y el mezclado hacen que se humedezcan las partículas de polvo y facilitan su captura.

Para lograr una buena eficiencia colectora, la velocidad del gas al atravesar la ranura debe ser suficientemente alta para producir una agitación violenta. la ranura puede ser larga y estrecha, circular y estrecha, una sola o múltiple.

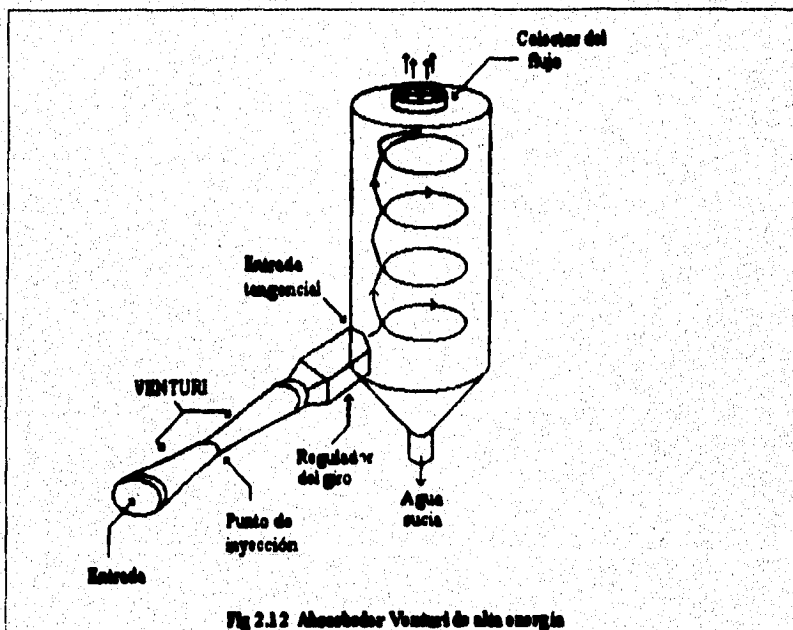
### 2.4.5 COLECTORES DE ALTA ENERGIA O VENTURI

El dispositivo venturi como su nombre lo indica, funciona básicamente con un venturi, donde el gas sucio pasa a través del artefacto antes mencionado que puede ser rectangular o redondo a velocidades altas o muy altas. Al pasar el gas por la garganta choca con el líquido provocando una formación de gotitas muy finas. La turbulencia resultante es extrema y por lo tanto se realiza una mezcla muy completa ( figura 2.12 ).

Debido a las grandes velocidades del gas, el venturi es el más compacto de todos los lavadores y absorbedores por vía húmeda, donde la eficiencia colectora es directamente proporcional a la energía consumida.

Entre los colectores Venturi más utilizados en la industria se encuentran:

- Venturi vertical con flujo de gas hacia abajo.
- Venturi rectangular con flujo de gas horizontal.
- Venturi de disco inundado.
- Venturi de orificio variable.
- Venturi de abertura anular.



## 2.5 PRECIPITADORES ELECTRICOS

Es un sistema basado en el principio de que las partículas cargadas eléctricamente sujetas a un campo eléctrico son atraídas hacia los electrodos que crean dicho campo y depositadas sobre ellos. La separación de las partículas suspendidas del gas requiere de tres etapas fundamentales:

- 1.- Introducción de una carga eléctrica sobre las partículas suspendidas.
- 2.- Depósito de las partículas cargadas, bajo la influencia del campo eléctrico, sobre los colectores.
- 3.- Transferencia del material recogido desde los electrodos a una tolva de almacenamiento de la que puede extraerse continuamente o a intervalos.

**Ventajas.**- Tiene una alta eficiencia colectora con un mínimo de costos de funcionamiento. Es el que exige menos energía de todos los colectores de gran eficiencia y el costo de mantenimiento es bajo por ser de acero, por funcionar en seco, por encima del punto de condensación. Entre las ventajas adicionales está la gran precisión en cualquier eficiencia colectora necesaria desde el flujo máximo a cero.

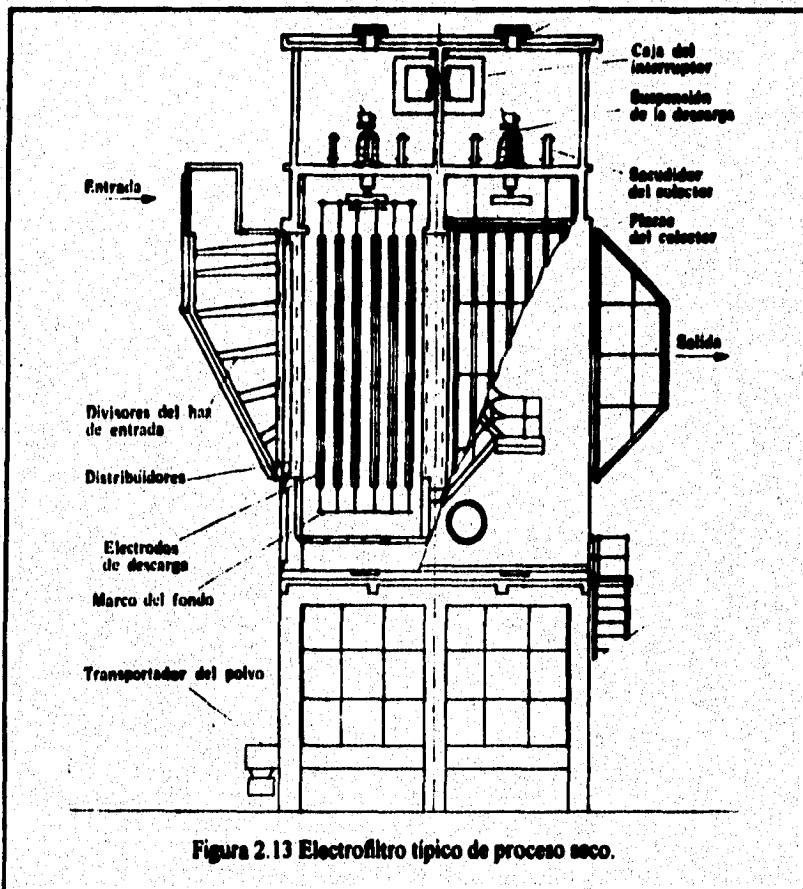
**Desventajas.**- Los inconvenientes especiales incluyen el costo elevado del aparato instalado, sobre todo en los tamaños inferiores a 23,500 l/s; la dudosa eficiencia colectora con determinados polvos de resistividad alta y la disminución de dicha eficiencia colectora cuando el flujo de gas es mayor del calculado para el modelo.

Existen varios tipos de precipitadores eléctricos, entre los cuales destacan por su importancia y uso en la industria:

- 1.- TIPO SECO.
  - PLACAS SECAS ( UNA SOLA FASE Y ALTO VOLTAJE )
- 2.- TIPO HUMEDO.

### 2.1.1 PRECIPITADOR ELECTRICO TIPO SECO

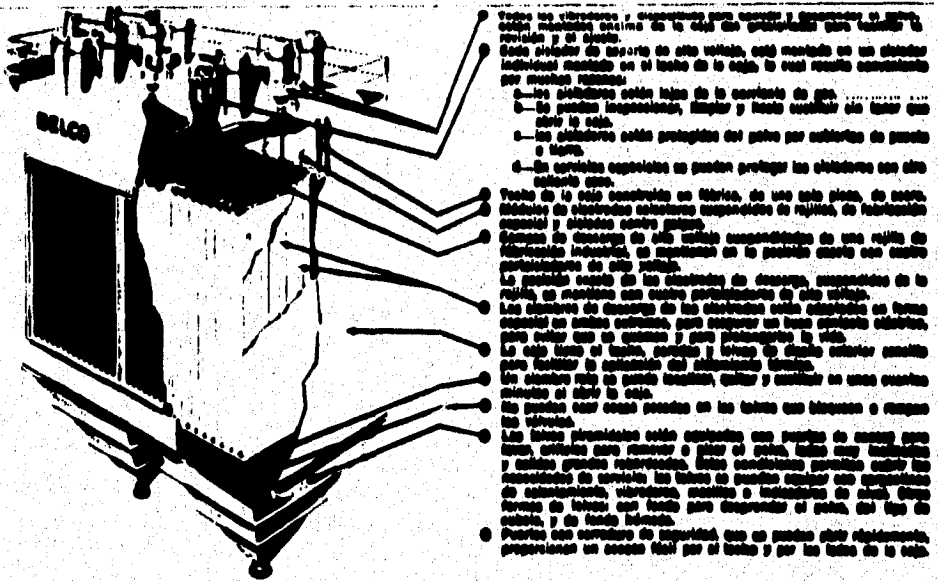
Es un precipitador donde el polvo se deposita en estado seco y se transfiere a las tolvas mediante secudida o vibración de los electrodos. En el extremo de la entrada de la envoltura hay un sistema de distribución de gas, formado por divisores triangulares, que hacen girar el gas desde la vertical a la horizontal y ayudan a mantener uniforme la velocidad del gas a través de la superficie total de los electrodos. A continuación de los distribuidores triangulares, el gas atraviesa los distribuidores de orificio, que tienen un efecto final de aislamiento del flujo de gas. La figura 2.13 muestra el diagrama esquemático de un precipitador del tipo seco.



## PRECIPITADOR ELECTRICO DE UNA SOLA FASE Y ALTO VOLTAJE

En este colector del tipo eléctrico la carga y la precipitación de polvo se llevan a cabo en una misma sección. El gas sucio pasa horizontalmente por conductos estrechos formados por filas paralelas de electrodos colectores conectados a tierra. En las líneas centrales de cada pasadizo de gas hay alambres especiales, de alto voltaje y aislados eléctricamente, que hacen que el gas sucio pase entre los alambres de alto voltaje y las placas conectadas a tierra.

La figura 2.14 muestra los principales componentes de un precipitador eléctrico de una sola fase y alto voltaje.



- Todas las vibraciones y desmontajes para limpiar y reparar el equipo, deben hacerse encima de la caja del precipitador para evitar la contaminación y el ruido.
- Este modelo de lavador de alto voltaje, está montado en un gabinete individual instalado en el techo de la caja. El cual resulta conveniente por muchos razones:
  - 1.— las placas están lejos de la corriente de gas.
  - 2.— se pueden inspeccionar, limpiar y hacer cualquier otro trabajo que abra la caja.
  - 3.— las vibraciones están protegidas del polvo por cubiertas de plástico o herra.
  - 4.— En algunas ocasiones se pueden proteger las vibraciones con otro sistema más.
- Todo el equipo está construido en fibra, de uso más plano, de acero. Módulos de electrodos colectores suspendidos de rejillas, de fabricación especial y aislados contra polvo.
- Corrientes de descarga de alta tensión suspendidas de una rejilla de fabricación industrial, se mantienen en la posición exacta con cuatro perforaciones de alta precisión.
- La rejilla superior de las vibraciones de descarga, suspendidas de la rejilla, se eleva con cuatro perforaciones de alta precisión.
- Los conductos de descarga de las vibraciones están aislados en forma especial en ambos extremos, para asegurar un buen contacto eléctrico, para evitar que se quemen y para protegerlos de la vida.
- La caja tiene el techo, paredes y fondo de diseño exterior sencillo para facilitar la inspección del funcionamiento interno.
- Un sistema más de placas recolectoras, quitar y sustituir en una cuestión minutos al abrir la caja.
- Un sistema más de placas recolectoras en los lados con bloques o rampas las vibraciones.
- Las líneas alimentadas están conectadas con puentes de conexión para tener, corriente para eliminar o quitar el polvo, hasta muy húmedas y otras grandes vibraciones. Entre condiciones perfectas están las necesidades de servicio. En todos se pueden equipar con dispositivos de calentamiento, vibradores, resacas o interruptores de alta. Otros formas de trabajo que hacen para comprender el polvo, del tipo de cubetas, y de fondo inferior.
- Puertas con cerradura de seguridad que se pueden abrir rápidamente, proporcionan un acceso fácil por el techo y por los lados de la caja.

Figura 2.14 Precipitador eléctrico moderno de placas secas

### **1.5.2 PRECIPITADOR ELECTRICO TIPO HUMEDO**

Es un dispositivo que trata los gases cargados de polvo en una condición saturada relativamente fría. Por lo tanto, la resistividad no constituye un problema y puesto que el polvo se separa mediante el lavado del sistema de electrodos con agua u otro líquido aconsejable. En el caso de que haya materiales pegajosos o adhesivos, los electrodos se irrigan continuamente. Esto aumenta la demanda de agua, por introducirse por medio de pulverizadores, debe ser baja por los estándares en sólidos suspendidos y, además, aumenta la complejidad del sistema de agua.

El precipitador húmedo, aunque muy eficaz con los polvos más finos y con materiales difíciles, está sujeto a problemas de corrosión, debido a la presencia de mezclas de gases ácidos corrosivos tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y cloruro de hidrógeno.



## **2.6 AGLOMERADORES SONICOS Y ULTRASONICOS**

Los colectores por aglomeración sónica y ultrasónica son sistemas donde las partículas de polvo se aglomeran, es decir, se pegan juntas, debido a diversas fuerzas naturales, la atracción molecular, o si se produce coalescencia entre las gotas de líquido y se forman gotas grandes únicas, por lo que se simplifica el proceso de separación de una corriente gaseosa, ya que se pueden utilizar cámaras sencillas de sedimentación o colectores por inercia o tipo ciclón.

La aglomeración ocurre en el precipitador electrostático, que se ha empleado así como base de un precolector para humo negro. Estos materiales aglomerados poseen elevada conductividad, por lo cual pueden reunirse en el precipitador, y se separan fácilmente mediante ciclones en una etapa posterior.

Dentro del grupo sónico y ultrasónico, los aglomeradores pueden clasificarse como:

- 1.- El oscilador de alta frecuencia.
- 2.- La sirena de alta frecuencia.
- 3.- El chorro Hartland.

# CAPITULO III

## **DISEÑO DEL COLECTOR DE PARTICULAS**

### **3.1. GENERALIDADES**

Los motores diesel emiten una gran cantidad de gases contaminantes, como óxidos de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas principalmente, que son producto de una combustión incompleta y son causantes de afecciones a la salud humana, por lo cual es conveniente tratar dichos gases para retirar la mayor cantidad de partículas contaminantes.

Las partículas son elementos residuales de la combustión cuyas características y dimensiones son tan variadas que es sumamente difícil evaluar sus propiedades. En la figura 3.1 se muestra un esquema con las características de partícula más comunes.

Los colectores de partículas del tipo ciclónico, son dispositivos que aprovechan la energía cinética de los gases sucios, para la recolección de partículas contenidas en los gases sucios. La separación sólido-gas se realiza por la fuerza centrífuga desarrollada dentro del cuerpo del ciclón, donde las partículas son arrojadas a la pared del colector y caen a un depósito por efecto de la gravedad. El colector ciclónico es esencialmente una cámara de sedimentación por gravedad, donde la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga.

Este tipo de aparatos constituyen uno de los sistemas para la separación de polvos más económicos, desde el punto de vista de la operación como de su inversión. Además es probablemente uno de los equipos más sencillos ( no existen partes móviles ) y de alta eficiencia de recolección.

Existen diversos estudios y trabajos acerca de este tipo de dispositivos en los cuales se ha pretendido encontrar un óptimo diseño que reúna alta eficiencia y poca caída de presión, sin embargo los conceptos de presión y eficiencia están tan íntimamente ligados que no es posible mejorar uno sin sacrificar al otro, por lo cual se ha llegado a diseños estandarizados de acuerdo a las necesidades primordiales. Entre los investigadores cuyos trabajos se han retomado para la mejora del diseño se encuentran:

- 1.- Peterson.
- 2.- Shepherd
- 3.- Swift
- 4.- Stairmand
- 5.- Licht

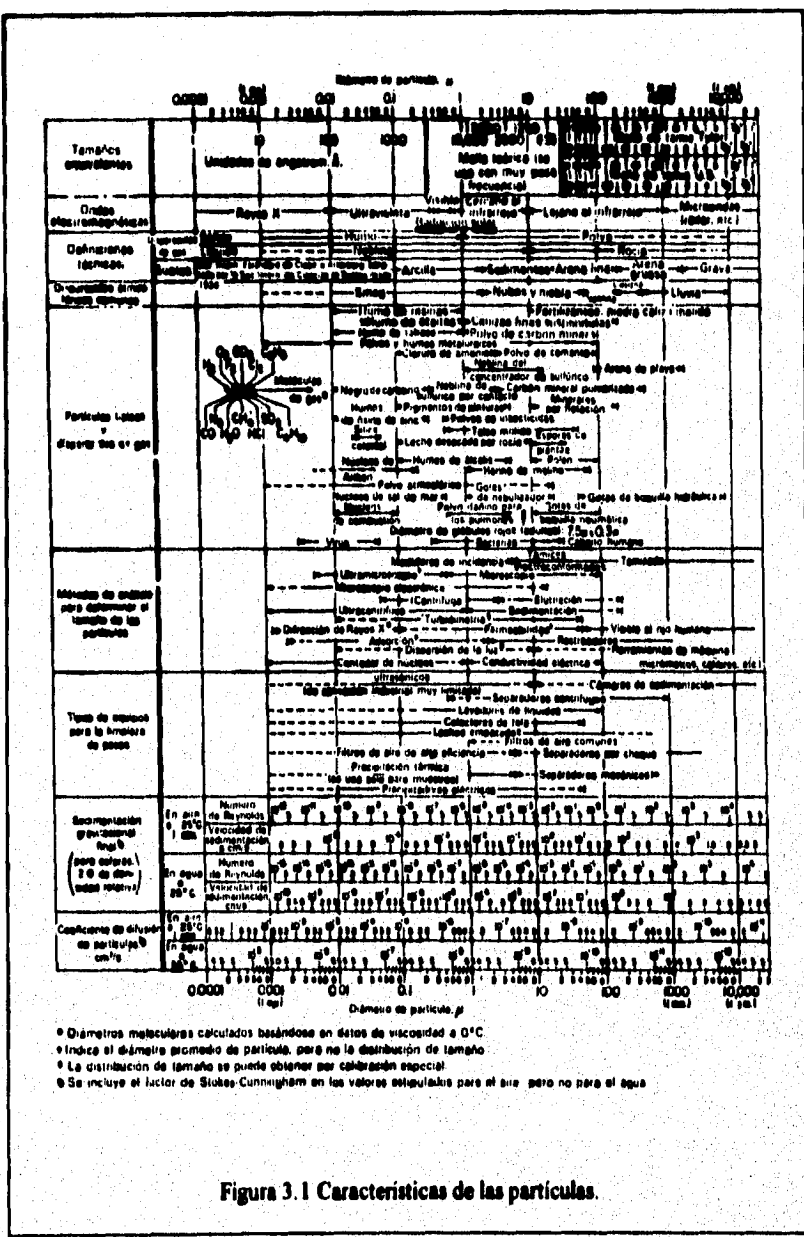


Figura 3.1 Características de las partículas.

En la tabla 3.1 se muestran diversas configuraciones de ciclones del tipo Ducloux (mostrado en la figura 3.2. a.) como resultado de investigaciones realizadas al ciclón.

Tabla 3.1. Configuraciones de Ciclones

Términos	Stairmand	Swift	Shpherd & Lapple	Swift	Peterson & Whitby
D	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a ... K <sub>a</sub>	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
b ... K <sub>b</sub>	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
s ... K <sub>s</sub>	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
D <sub>0</sub> ... K <sub>D<sub>0</sub></sub>	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
h ... K <sub>h</sub>	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
H ... K <sub>H</sub>	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
J <sub>c</sub> ... K <sub>J<sub>c</sub></sub>	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5

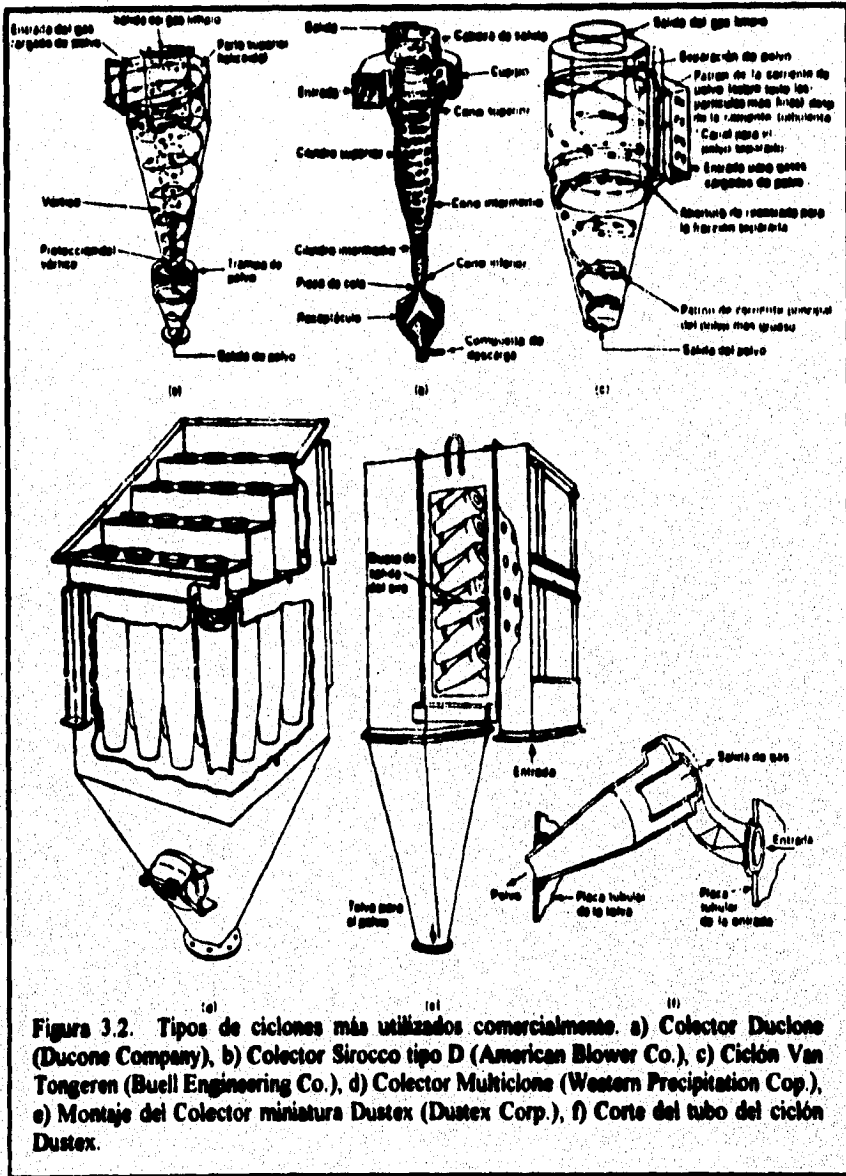
A Alta Eficiencia

Propuesta General

La figura 3.2 muestra seis tipos de ciclones típicos utilizados comercialmente en la industria ambiental.

El dispositivo separador de partículas ha estudiar y diseñar es del tipo Ducloux que presenta una entrada tangencial y descarga axial. Debido a su sencillez y confiabilidad es el colector más utilizado comercialmente y por lo tanto el más estudiado.

El diseño tiene que ser de óptima eficiencia con respecto a la caída de presión, para lo cual se ha retomado el método sugerido por Leith y Licht, asumiendo que existe una mezcla continua de partículas en la dirección radial y considerando las experiencias de Stairmand, Swift, Lapple, Peterson y Whitby.



## 3.2 FUNDAMENTOS TEORICOS

### CONFIGURACION DEL CICLON ( NOTACION BASICA )

La figura 3.3 muestra la notación utilizada durante el presente capítulo para denotar la configuración del colector ciclónico de entrada tangencial y descarga axial.

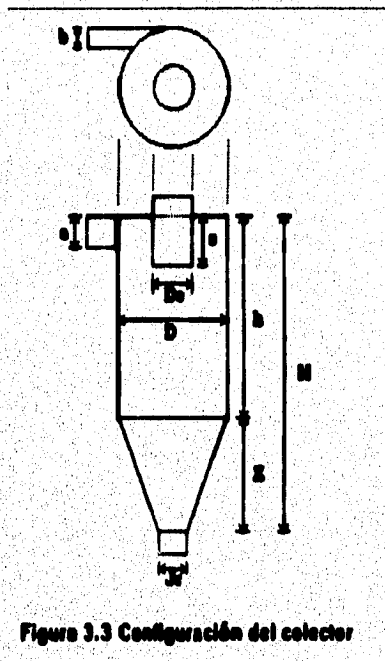


Figura 3.3 Configuración del colector

Donde:

$D$ .- diámetro del cuerpo del ciclón.

$D_c$ .- diámetro del ducto de descarga de gases limpios.

$a$ .- altura del ducto de entrada.

$b$ .- ancho del ducto de entrada.

$h$ .- longitud del cuerpo.

$Z$ .- longitud del cono.

$J_c$ .- diámetro del conducto de descarga de polvos.

$s$ .- altura del ducto de descarga de gases limpios.

$H$ .- altura total.

### 3.3.3 PATRON DE CIRCULACION

En un ciclón la trayectoria del gas inicia en la entrada tangencial del ciclón y cerca del cuerpo cilíndrico se crea un vórtice o remolino, donde el gas dibuja una espiral descendente entre la pared del ducto de descarga para gases limpios y el cuerpo del ciclón. Este remolino llamado vórtice principal sigue la trayectoria descendente hasta una región cerca de la pared inferior del cono, donde se genera un vórtice interno ascendente, llamado núcleo del vórtice, que es un flujo en espiral en dirección contraria al flujo axial, pero que mantiene la dirección de rotación.

La trayectoria del gas, mostrada en la figura 3.4, sufre una redistribución en su velocidad, de tal modo que la componente tangencial de la velocidad aumenta al reducirse el radio, de acuerdo a la ley del vórtice  $U_t R^n = \text{cte}$ . La velocidad espiral dentro de un ciclón puede alcanzar valores mucho mayores que la velocidad promedio del gas a la entrada.

La velocidad tangencial del gas en el vórtice principal se evalúa de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U_t = U_p (R_p/R)^n \quad (1)$$

Donde:  $U_t$  - velocidad tangencial a un radio  $R$   
 $U_p$  - velocidad tangencial al perímetro  
 $R_p$  - radio del cuerpo del ciclón  
 $R$  - radio  
 $n$  - exponente adimensional

La fuerza radial impartida a la partícula se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_s = \beta \rho_p D_p^2 U_t^2 R_p^{2n} \left[ \frac{1}{gR(2n+1)} \right] \quad (2)$$

Donde:  $\beta$  - factor de forma del volumen  
 $\rho_p$  - densidad de la partícula  
 $D_p$  - diámetro de partícula  
 $g$  - gravedad

El exponente del vórtice se obtiene por la siguiente relación empírica encontrada por Alexander [ 2].



$$n = 1 - [1 - 0.67D^{0.16}] \left[ \frac{T}{283} \right]^{0.3} \quad (3)$$

Donde: T.- temperatura del gas (°K)

La trayectoria de la partícula puede ser representada por el tiempo de residencia [ 3 ], que se evalúa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$t = 9\mu R_1^2 / \rho D p^2 U_i^2 \left( \frac{1}{n+1} \right) \left[ \left( \frac{R}{R_1} \right)^{(2n+2)} - 1 \right] \quad (4)$$

Donde:  $\mu$ .- viscosidad dinámica del flujo  
 $\rho$ .- densidad del flujo  
 R.- radio del cuerpo del ciclón  
 $R_1$ .- radio  $r_1$

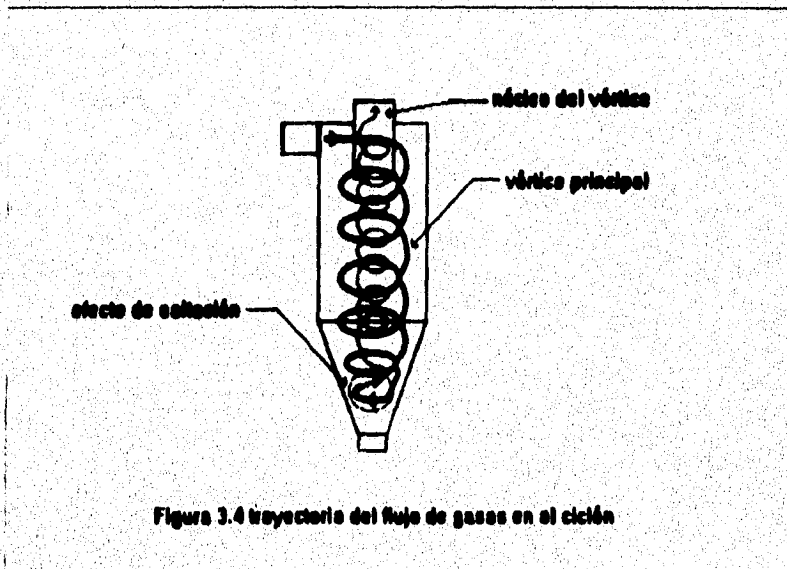


Figura 3.4 trayectoria del flujo de gases en el ciclón

### 3.3.3 EFECTO DE LA SALTACION

En los colectores ciclónicos, a medida que aumenta el flujo de gas (velocidad de entrada) se incrementará la eficiencia de recolección del ciclón hasta aproximarse al cien por ciento. Sin embargo a un punto límite de velocidad, la eficiencia disminuirá debido a que se presentaría una retroalimentación de las partículas por efecto de la saltación.

La saltación se refiere a la transición que sufre el vórtice principal y el núcleo del vórtice, es decir, es el punto en el cual el remolino descendente (vórtice principal) genera al remolino interior ascendente (núcleo del vórtice), como puede observarse en la figura 3.4

La velocidad de saltación es entonces, la velocidad a la cual la velocidad tangencial del flujo de gas descendente cambia a una interna ascendente. Puede evaluarse por medio de la relación empírica establecida por Kalen y Zenz [ 2 ].

$$U_s = 2.055 \left[ 4g\mu_p / 3\rho^2 \right]^{1/3} \left[ \frac{(b/D)^{0.4}}{(1-b/D)^{1/3}} \right] D^{0.867} U_1^{2.3} \quad (5)$$

Donde: D.- diámetro del ciclón.

Kalen y Zenz encontraron que la máxima eficiencia de recolección ocurre a:

$$U_1 / U_s = 1.25 \quad (6)$$

Además encontraron que el fenómeno de retroalimentación comienza a ser significativo cuando:

$$U_1 / U_s = 1.36 \quad (7)$$

Si se cumplen las siguientes condiciones:

1.  $T = 100 [ ^\circ F ]$
2.  $\rho_p = 2.58 [ g/cm^3 ]$

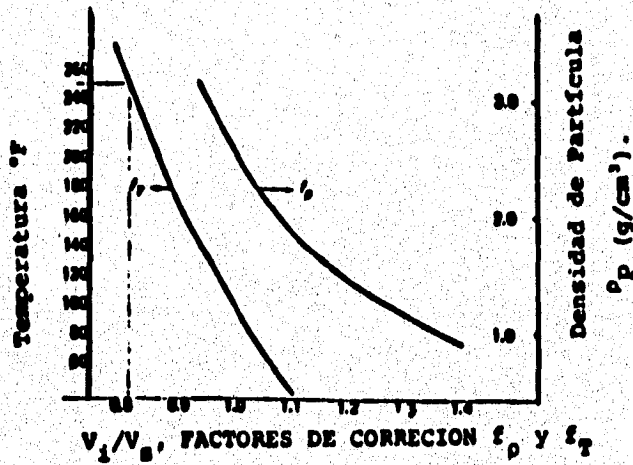
También Koch y Licht encontraron que las relaciones ( 6 ) y ( 7 ) son confiables para un rango de velocidad (  $U_1$  ) de 15.24 - 21.34 [ m/s ] y una relación  $b/D = 0.2$

Como se mencionó anteriormente, las relaciones (6) y (7) cuentan con algunas restricciones, sin embargo, si las condiciones de  $T$  y  $\rho_p$  no se cumplen, puede realizarse la siguiente corrección:

$$U_1/U_2 = f_T f_\rho (U_1/U_2) \quad (8)$$

Dónde:  $f_T$  - factor de corrección de la temperatura  
 $f_\rho$  - factor de corrección de la densidad de partícula

Correspondientes a la gráfica 3.1.



Gráfica 3.1. Factores de corrección.

### 3.2.4 CAIDA DE PRESION

Existen numerosos estudios acerca de la caída de presión en ciclones, pero desafortunadamente no se ha encontrado un método exacto para su evaluación. Generalmente las pérdidas por presión ocurren por los siguientes factores:

- Pérdidas por fricción en el ducto de entrada
- Pérdidas debida a una expansión repentina del flujo de gas en el cuerpo del ciclón
- Pérdidas por fricción debido al contacto con las paredes del ciclón
- Pérdidas en la energía cinética por la turbulencia del ciclón
- Pérdidas por una repentina contracción en la corriente de gas en la entrada del ducto de escape
- Pérdida en la carga estática por la diferencia en la elevación entre los ductos de entrada y descarga
- Pérdidas por recuperación de energía en el ducto de descarga
- Pérdidas por fricción en el flujo a través del ducto de descarga

La caída de presión puede ser determinada experimentalmente por el método desarrollado por Alexander [ 1 ], que se expresa en términos de la carga de la velocidad y por el método sugerido por Shepherd y Lapple [ 3 ], que se expresa en centímetros de agua o en pulgadas de agua.

$$NH = C_1 ab / D_0^2 \quad (9)$$

Donde: NH.- caída de presión ( resistencia del ciclón ) [ carga en la velocidad ]  
 C.- constante de proporcionalidad ( adimensional )

$$C_1 = 4.62 \frac{D_0}{D} \left\{ \left[ \frac{D}{D_0} \right]^{2n} \cdot 1 \right\} \left( \frac{1 \cdot n}{n} \right) + f \left( \frac{D}{D_0} \right)^{2n} \quad (10)$$

Donde: f.- función que varia con el exponente del vórtice ( n )

n	0.0	0.20	0.40	0.60	0.80
f	1.9	1.94	2.04	2.21	2.40

$$\Delta P = 5.12 \rho_a U^2 NH \quad (11)$$

Donde:  $\Delta P$  - caída de presión [ cm. H<sub>2</sub>O ]

### 3.3.9 EFICIENCIA

Numerosos estudios se han realizado en torno a la teoría de la eficiencia de recolección de un ciclón, sin embargo no se ha llegado a una completamente aceptada, siendo una de las expresiones más satisfactorias la relación empírica propuesta por Rosin, Ramunder e Intelman [ 4 ]. Estos científicos dedujeron la siguiente ecuación para el tamaño de la partícula de diámetro mínimo que se separa a 50 % de eficiencia del ciclón.

$$D_{50} = [ 1.19683 \mu^{0.5} / (\rho_p - \rho_a)^{0.5} ] \left[ \frac{b}{N_e U_1} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Donde:  $D_{50}$  - diámetro de corte de la partícula [  $\mu\text{m}$  ]  
 $N_e$  - número efectivo de vueltas ( adimensional )

El número efectivo de vueltas se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_e = \frac{1}{8} \left[ \frac{Z}{2} + h \right] \quad (13)$$

Los estudios más satisfactorios que se han efectuado teóricamente son los realizados por Licht [ 1 ], donde se implementa un parámetro que involucra la geometría del colector ( factor importante en la evaluación de la eficiencia ). El coeficiente de la geometría del ciclón se obtiene por medio de la ecuación siguiente, para una relación  $KH = 5$  y  $Kh = 3$ .

$$C = \pi \frac{D^2}{ab} \left\{ \frac{1}{3} \left[ \frac{L}{D} + K_s \cdot Kh \right] \left[ 1 + \frac{d}{D} + \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right] + K_s - \left( \frac{L}{D} \right) K_{D_0}^2 - K_s + \dots \right. \\ \left. \dots + (1 - K_{D_0}^2) \left[ K_s + \frac{9}{2D} \right] 2 \right\} \quad (14)$$

Donde: C - coeficiente de la geometría del ciclón ( adimensional )

Siendo:

$$\frac{L}{D} = 2.3 \frac{D_0}{D} \left[ \frac{D^2}{ab} \right]^{1/3}$$

$$\delta = D - \frac{(D - J_c)(s + L + h)}{H - h}$$

Donde:

$\delta$  - parámetro del coef. de la geometría del ciclón ( adimensional )

Por lo que la eficiencia se evalúa de la siguiente manera:

$$\eta = 1 - e [ -2 ( C \Psi )^{1/(2n+2)} ] \quad (15)$$

Donde:  $\eta$  - eficiencia de recolección ( ( adimensional o en % ) )

$\Psi$  - coeficiente de la eficiencia ( adimensional )

$$\Psi = [ \rho_p D_p^2 U_c (n+1) ] / 18 \mu D \quad (16)$$

La eficiencia varía a diferentes condiciones de operación, que pueden obtenerse mediante las siguientes relaciones empíricas:

$$(100 - \eta_a) / (100 - \eta_b) = (Q_a / Q_b)^{0.5} \quad (17)$$

$$(100 - \eta_a) / (100 - \eta_b) = (\mu_a / \mu_b)^{0.5} \quad (18)$$

$$(100 - \eta_a) / (100 - \eta_b) = [ (\rho_p - \rho_g) / (\rho_p - \rho_g) ]^{0.5} \quad (19)$$

Donde:  $\eta_{a,b}$  - eficiencia de recolección a condición a y b ( % )

$Q_{a,b}$  - gasto volumétrico a condición a y b ( m<sup>3</sup>/s ó ft<sup>3</sup>/s )

$\mu_{a,b}$  - viscosidad dinámica ( Pa·s ó Poises ó Lbf·s/ft<sup>2</sup> ó Slug/ft·s )

$\rho_{p,g}$  - densidad del gas a condición a y b ( Kg/m<sup>3</sup> ó Lb/ft<sup>3</sup> )

### 3.2.3 EFECTIVIDAD

El factor de efectividad es un indicativo del rendimiento del colector ciclónico, debido a que está en función de la eficiencia y caída de presión [ 9 ], la cual se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$q = [- \text{Ln} ( 1 - \eta ) ] / \Delta P \quad (20)$$

Donde:  $q$  - factor de efectividad ( adimensional )

$\Delta P$  - caída de presión expresada como carga en la velocidad ( adim. )

## 3.3 CONSIDERACIONES PRACTICAS

### 3.3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA Y CAIDA DE PRESION

#### A) *Díametro del cuerpo del colector y relación con las demás dimensiones.*

Los ciclones de gran eficiencia pueden ser diseñados incrementando la longitud del ciclón, disminuyendo el ancho de la entrada o incrementando la relación de diámetro del cuerpo-diámetro de escape ( proporcionando al mismo tiempo un menor diámetro de cuerpo ).

La longitud del cuerpo del ciclón es de gran importancia para la eficiencia de recolección, debido a que un incremento en la longitud proporciona un mayor tiempo de residencia del gas en el vórtice y por lo tanto un mayor número de vueltas en el vórtice.

Numerosos estudios se han realizado acerca de la altura en la zona del vórtice principal y se ha llegado a la conclusión que la altura mínima debe ser 5.5 veces el diámetro del ducto de escape, pero se recomienda preferentemente una altura mayor a 12 veces el diámetro de escape.

Incrementando la relación diámetro del cuerpo-diámetro de escape a una relación de 3 se obtiene una pequeña ganancia en la eficiencia de recolección, pero por otra parte se incrementará la caída de presión.

#### B) *Diseño del cono.*

El cono tiene la función práctica de liberar el polvo a un punto central para un arreglo común, por lo cual es importante en el diseño de un ciclón, pero no es necesario. Las dimensiones del cono pueden ser cualquiera, pero es importante una adecuada longitud del cono para eliminar la posibilidad de una retroalimentación del polvo ( 1 - 4 veces el diámetro del ducto de escape ).

#### C) *Diseño de la entrada.*

El diseño de la entrada del colector ciclónico es de una importancia crítica para la eficiencia y caída de presión. Existen tres tipos de entradas tangenciales que se muestran en la figura 3.5

- 1.- Helicoidal
- 2.- Envolverte

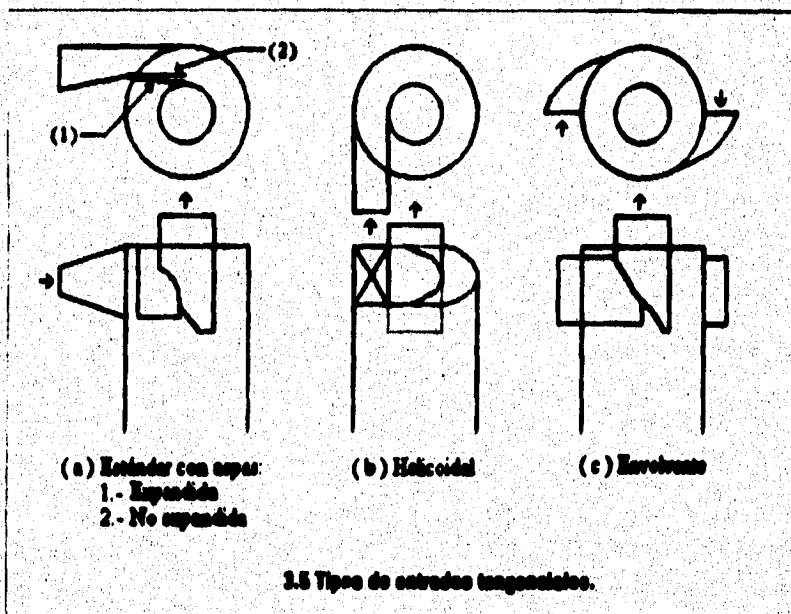


### 3.- Entradas de aspas

**Helicoidal.** - La entrada helicoidal actualmente ya no es utilizada con frecuencia porque presenta una baja eficiencia.

**Envolvente.** - El diseño de entrada envolvente no cuenta con datos suficientes de los efectos sobre la eficiencia y caída de presión en el ciclot, pero ha sido desarrollado para que a una misma área y altura, el ancho en la entrada se reduce.

**Entrada con Aspas.** - Este tipo de entradas han sido desarrolladas para disminuir las pérdidas por presión. Existen dos tipos; a) Entrada de aspa no expandida, donde la caída de presión varía en 1 - 1/2 con respecto a una misma entrada sin aspas. b) Entrada de aspa expandida, donde la caída de presión varía en 1 - 4 con respecto a una misma entrada sin aspas.



### **D) Descarga de polvos**

Es importante en el diseño de un ciclón el separar las partículas contaminantes tan pronto como sea posible. El sistema más simple para recolectar los polvos separados es una tolva o depósito de polvos.

En la conexión entre la descarga de polvos y la tolva, se puede presentar un flujo ascendente excesivo ( flujo tan parecido al núcleo del vórtice ). Para prevenir esta situación puede utilizarse un arreglo de aletas o un desviador ( disco o cono ) instalado a dos veces el diámetro de descarga de polvo sobre la cima del cono que es aproximadamente a tres pulgadas entre la orilla del desviador y la pared del disco.

### **E) Diseño del ducto de gases de escape**

El flujo de gas fuera del ducto de los gases de escape contiene una energía en exceso que la de un flujo normal. Existen varios aparatos para recobrar la presión y energía en el tubo de escape. Para una mayor recuperación en la presión existen 2 diseños de ductos de escape ( mostrados en la figura 3.6 ):

- 1.- Involuta espiral
- 2.- Escape de tambor

El diseño de escape de tambor opera como un ciclón en reversa tendiendo a convertir un flujo del vórtice trasero dentro de un flujo lineal. Este tipo de arreglo puede disminuir en un 5 - 10 % la caída de presión sin un efecto sobre la eficiencia.

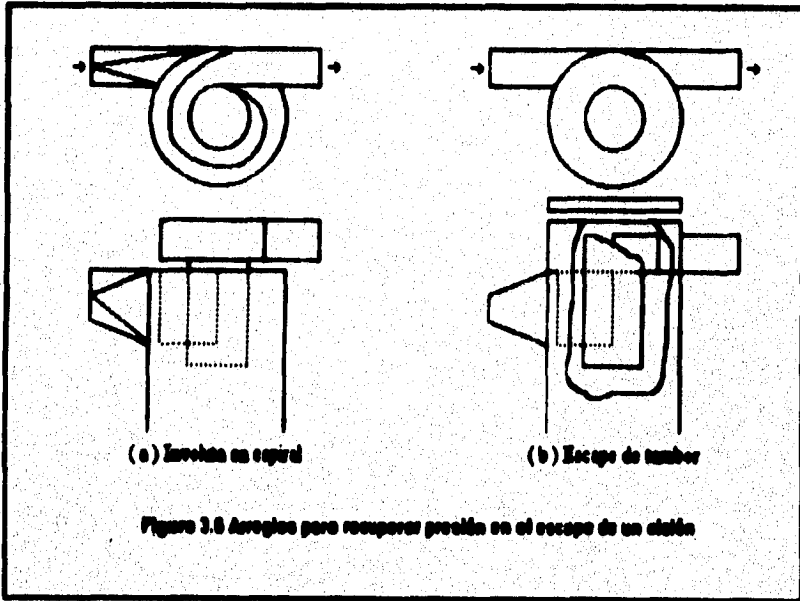
### **F) Efectos de la rugosidad interna**

La rugosidad en las paredes del ciclón disminuye la caída de presión, porque la intensidad del vórtice es reducida, pero también disminuye la eficiencia de recolección de las partículas.

Otros aspectos importantes a considerar en el diseño de un ciclón, son una serie de restricciones para satisfacer la operación práctica del colector, los cuales se enuncian a continuación:

1.  $a < s \Rightarrow$  ( prevención de cortos circuitos )
2.  $b < \frac{1}{2}(D - D_e) \Rightarrow$  ( eliminación de contracciones repentinas )
3.  $s + L \leq H \Rightarrow$  ( mantener el torbellino dentro del ciclón )
4.  $s < h$
5.  $h < H$
6.  $\Delta P < 10$  [ in. H<sub>2</sub>O ]

7.  $U_t / U_s \leq 1.35 \Rightarrow$  (prevenir inversión de flujo)  
8.  $U_t / U_s \leq 1.25 \Rightarrow$  (obtener óptima eficiencia)



### 3.4 DISEÑO DEL CICLÓN

Existen diversos factores que afectan el rendimiento de un colector ciclónico, pero existen tres variables fundamentales en el diseño de un ciclón:

- 1.- Eficiencia de recolección
- 2.- Caída de presión
- 3.- Costos

Estos parámetros están íntimamente ligados uno del otro, por lo cual es necesario establecer los límites permisibles de cada uno de ellos.

La eficiencia de recolección depende de:

- Dimensiones del ciclón
- Propiedades de los gases sucios
- Propiedades de las partículas suspendidas
- Velocidad de entrada de los gases y temperatura
- Rugosidad del material

La caída de presión depende de:

- Dimensiones del ciclón
- Diseño de la entrada para gases sucios y ducto de escape para gases limpios
- Velocidad de entrada de gases y temperatura de los mismos
- Rugosidad del material

Los costos dependen de:

- Dimensiones del ciclón
- Materiales

Como se puede observar en la eficiencia, caída de presión y costos, las dimensiones del ciclón afecta a los tres parámetros importantes de diseño. Por lo tanto las dimensiones del ciclón es la única variable, junto con el material, que podemos analizar para obtener un diseño más eficiente y de menor caída de presión, sin olvidar un menor costo. Para este diseño en particular no se considerará al costo como un factor primordial, solamente se analizará la geometría del colector, a fin de obtener un óptimo diseño.

Sabemos que a una mayor eficiencia existirá una mayor caída de presión, por lo cual, las dimensiones adecuadas serán aquellas que proporcionen una mayor eficiencia y menor caída de presión ( considerando los costos ).

Con un diseño de geometría que optimice la eficiencia y la caída de presión se partió de una serie de suposiciones iniciales que permitieron establecer una propuesta apegada a la realidad. Tales suposiciones fueron consideradas en base a las experiencias en motores diesel, considerando un funcionamiento común para autobuses.

Suposiciones:

- 1.-  $T_{\text{gases de escape}} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( después del silenciador )
- 2.-  $V_{\text{gases de escape}} = 25 \text{ Km/hr}$ .
- 3.-  $\varnothing_{\text{ducto de escape del motor}} = 5.7 \text{ cm}$
- 4.-  $\rho_p = 1414.1 \text{ kg/m}^3$  ( 90% sol. y 10% liq. de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  )
- 5.-  $\rho_f = 143.904 \text{ Kg/m}^3$  ( 90% gas y 10% part.  $\text{SO}_x, \text{NO}_x$  )
- 6.-  $\rho_g = 2.772 \text{ Kg/m}^3$  (  $\text{SO}_x, \text{NO}_x$  )
- 7.-  $\mu = 1.4065 \times 10^{-3} \text{ Na/m}^2$
- 8.-  $D_p = 10 \text{ } \mu\text{m}$  ( diámetro al cual el ciclón debe separar perfectamente las partículas )

Las suposiciones 4 - 7 se obtuvieron de tablas localizadas en la referencia [ 3 ].

Con las suposiciones consideradas inicialmente se propuso un diseño apegado a los convencionales de alta eficiencia, para obtener el diámetro del cuerpo del ciclón adecuado a las dimensiones de un camión de transporte urbano. El diámetro se encontraba en un rango de 4 - 10 ". Analizando brevemente los resultados obtenidos se observó que el diámetro debería ser de 4 ó 6 ".

Obtenidos los diámetros adecuados se analizó la eficiencia y caída de presión correspondientes, encontrando que a un diámetro de 4" existía una alta eficiencia de recolección de partículas, pero una gran caída de presión. A un diámetro de 6" la eficiencia disminuye, pero es sumamente aceptable ( mayor a diseños convencionales ) mientras que la caída de presión disminuye considerablemente. De esta manera se determinó que el diámetro adecuado debería ser de 6".

Con el diámetro de 6" se replanteo el problema a fin de obtener un diseño lo más eficiente posible y con menor caída de presión. Variando la geometría del colector se

llegó a cuatro propuestas analizables. El criterio que se consideró para llegar a las propuestas fue el factor de efectividad, tomando en cuenta un diámetro de partícula de  $5 \mu\text{m}$ .

Las propuestas se obtuvieron de la siguiente manera:

1. Manteniendo una altura constante en la entrada del ciclón ( $\theta = 3^\circ$ )
2. Variando el diámetro de descarga ( $D_d$ )
3. Variando el ancho de la entrada ( $b$ )
4. Variando la altura del tubo de descarga ( $s$ )
5. Variando el diámetro de descarga de los polvos ( $J_c$ )
6. Variando la altura del cilindro ( $h$ )
7. Variando la altura del cono ( $Z$ )

### 3.5 RESULTADOS TEORICOS

El análisis de los resultados obtenidos arrojó cuatro propuestas configurativas para el ciclón, las cuales se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propuestas de diseño del ciclón.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
$D_1$	6.0"	6.0"	6.0"	6.0"
$K_{D_1}$	0.65	0.65	0.65	0.65
$K_2$	0.50	0.50	0.50	0.50
$K_3$	0.15	0.15	0.20	0.25
$K_4$	0.65	0.65	0.65	0.65
$K_{12}$	0.50	0.50	0.50	0.50
$K_5$	2.50	3.00	3.00	3.00
$K_{11}$	4.00	5.00	5.00	5.00

Obteniéndose la gráfica comparativa entre ciclones ( gráfica 3.2 ), se muestra que el modelo configurativo dos tiene la mayor eficiencia de recolección.

En base al factor de efectividad y considerando recomendaciones prácticas se determinó que la mejor configuración es la número dos.

Realizando una comparación entre el diseño configurativo dos y los existentes en el mercado, se obtuvo la gráfica 3.3, donde se observa una mejor eficiencia y una menor caída de presión con respecto a los convencionales.

Con el diseño configurativo previamente establecido se obtuvieron las gráficas de operación del colector a distintas condiciones de trabajo ( velocidad del flujo de gases y temperatura ).

La gráfica 3.4 muestra el comportamiento del ciclón a diferente viscosidad de flujo de gases, con diversos diámetros de partícula. Se observa que con diámetros de partícula mayores a  $5 \mu\text{m}$  la eficiencia no sufre cambios significativos, pero con partículas de aproximadamente  $1 \mu\text{m}$  la eficiencia sufre cambios bastante considerables.

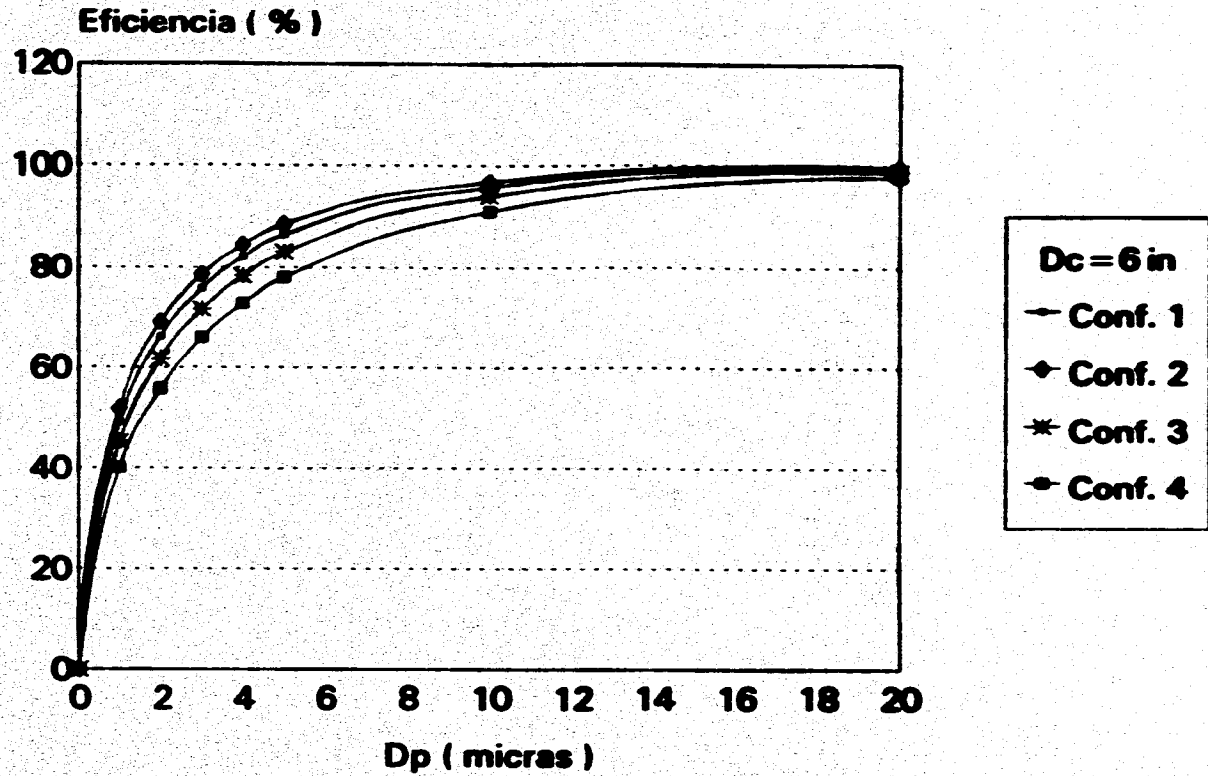
La gráfica 3.5 muestra el comportamiento del ciclón a diferente densidad de flujo de gases, con diversos diámetros de partícula. Se observa que la densidad no afecta a la eficiencia de recolección.

La gráfica 3.6 muestra el comportamiento del ciclón a diferentes velocidades de gases, con diversos diámetros de partícula. Se observa que la eficiencia prácticamente se mantiene constante con partículas superiores a  $5 \mu\text{m}$ , pero con partículas de valores aproximados a  $1 \mu\text{m}$  la eficiencia cambia notablemente.

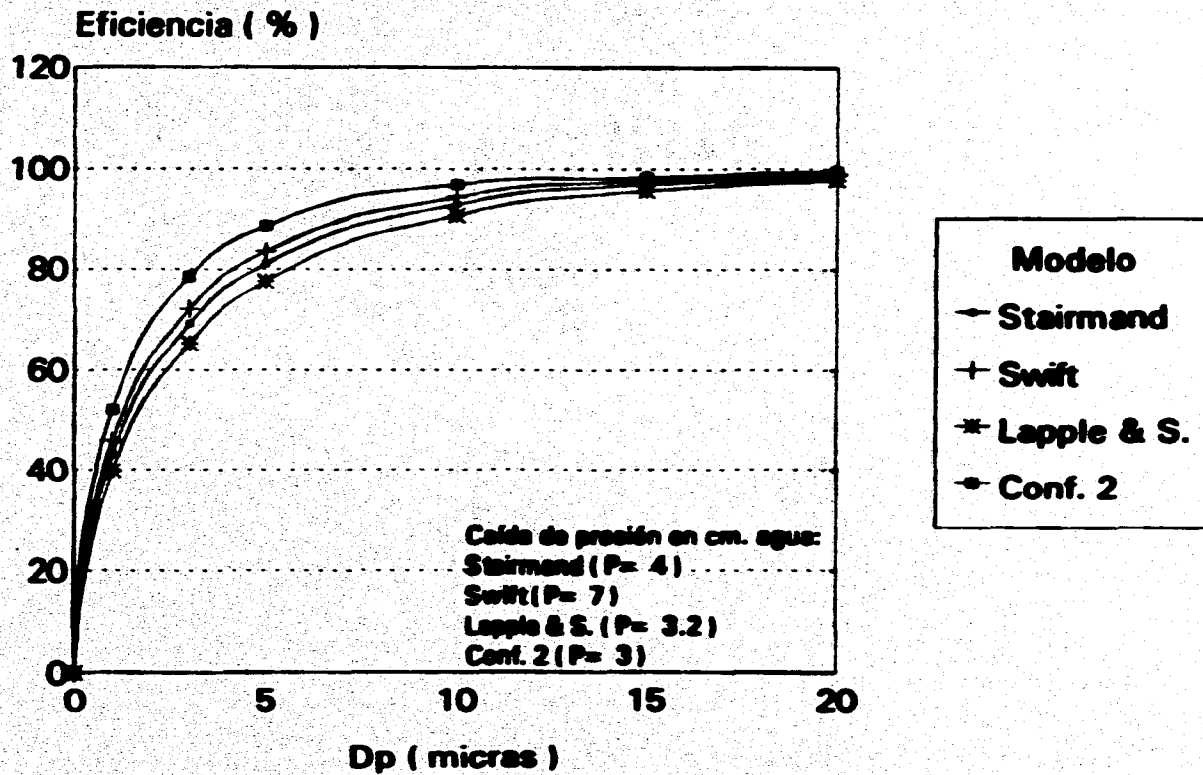
La gráfica 3.7 muestra el comportamiento del ciclón para la caída de presión con diferentes velocidades de gases. Se observa un comportamiento tipo logarítmico, en donde a velocidades superiores a  $20 \text{ m/s}$ , la caída de presión excede los  $25.4 \text{ cm de H}_2\text{O}$  recomendados en la práctica.

La gráfica 3.8 muestra el rendimiento del ciclón (factor de efectividad) a diferentes diámetros de partícula, con diversas velocidades de gases. Se observa un comportamiento lineal de pendiente positiva, donde el colector presenta rendimientos bastante aceptables con partículas mayores a  $5 \mu\text{m}$  ( $q > 1$ ) con cualquier velocidad de gases.

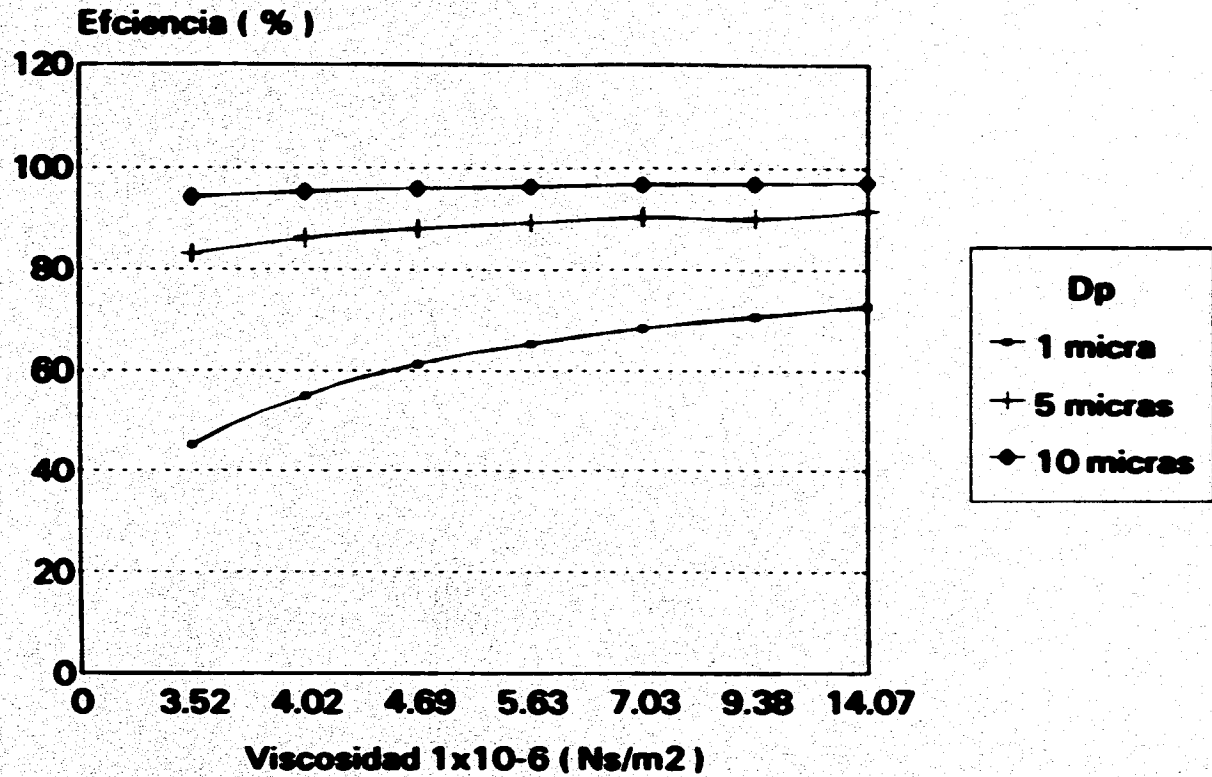




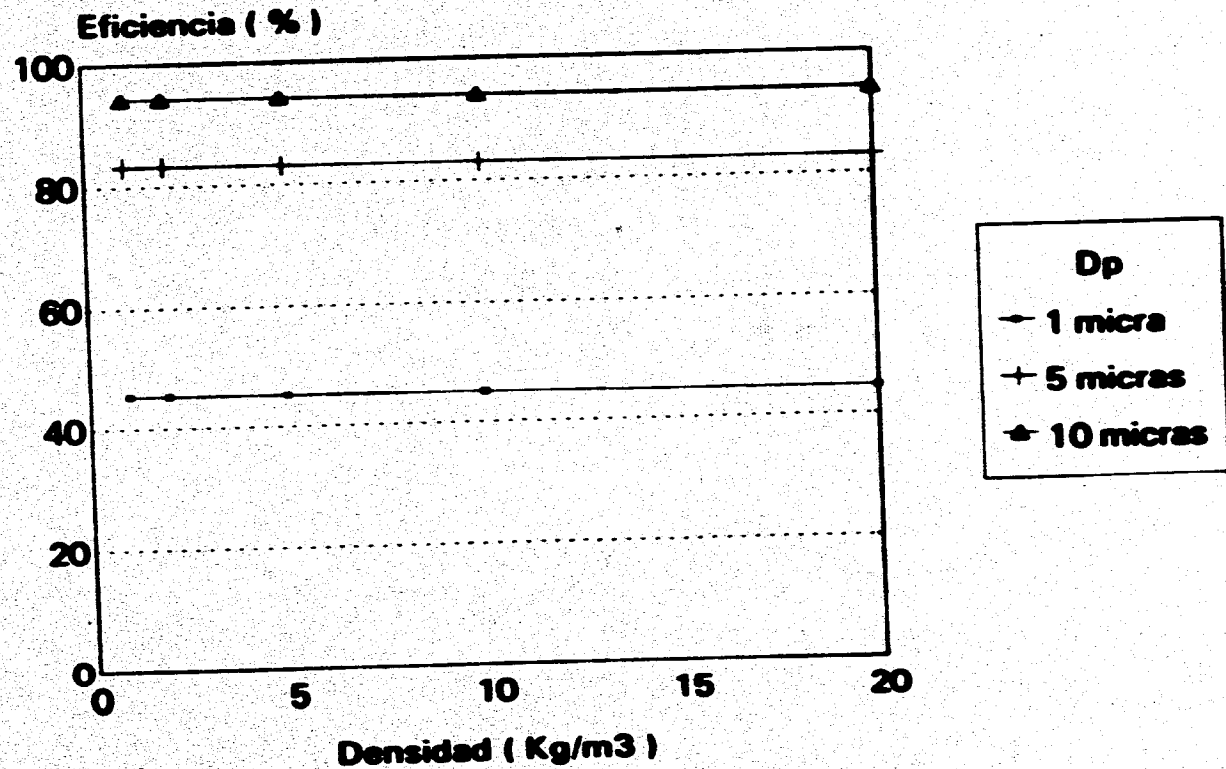
- Gráfica 3.2 Colector a diferentes configuraciones geométricas.



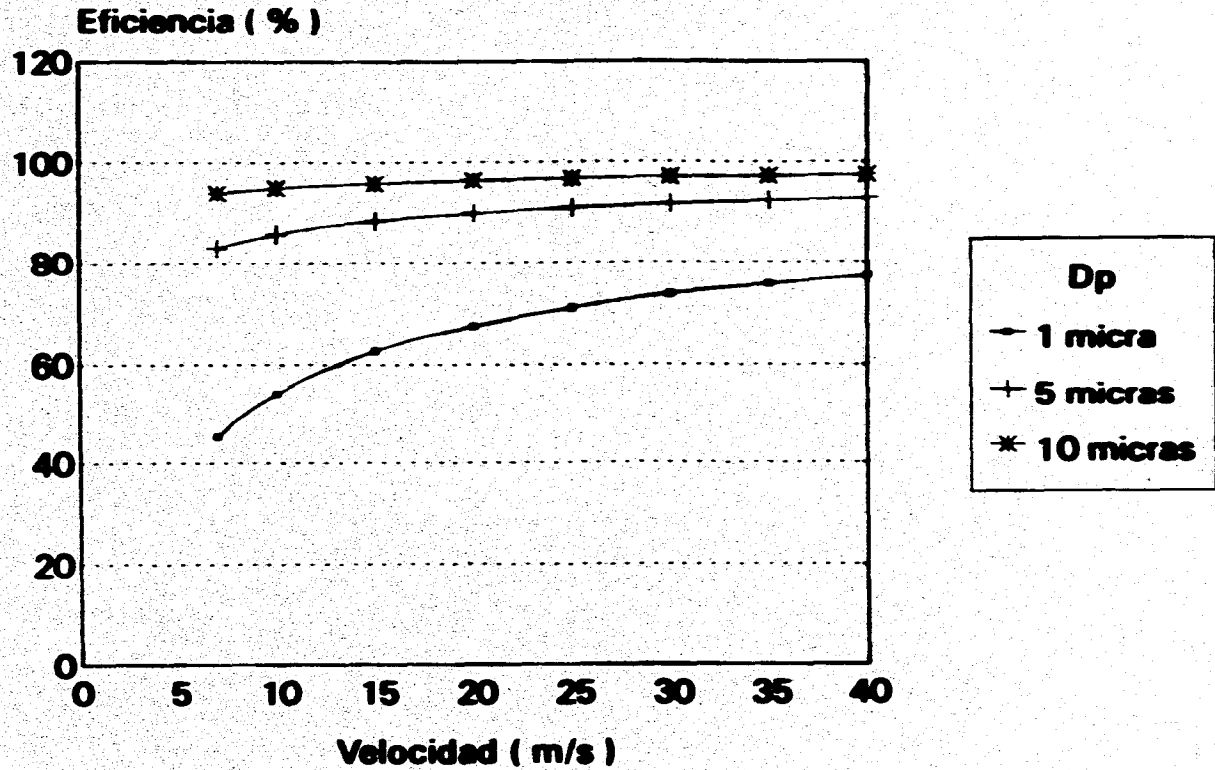
- Gráfica 3.3 Comparación de diferentes tipos de colectores



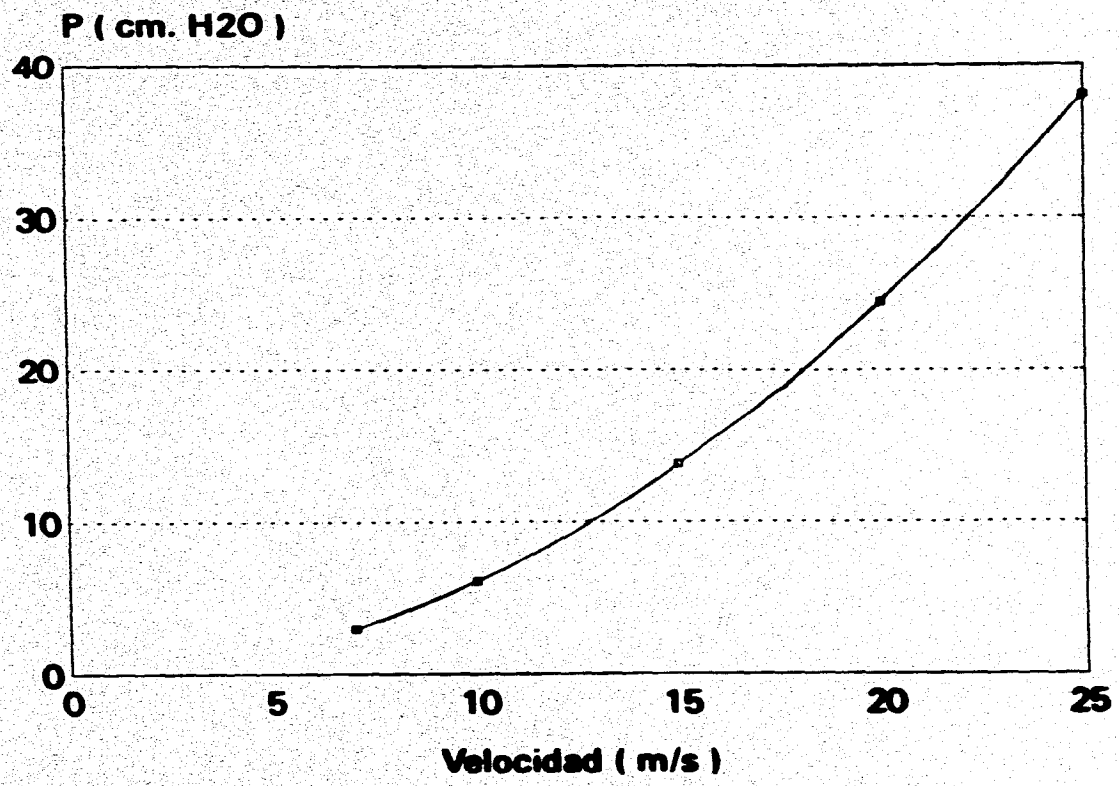
- Gráfica 3.4 Operación a diferente viscosidad de los gases.



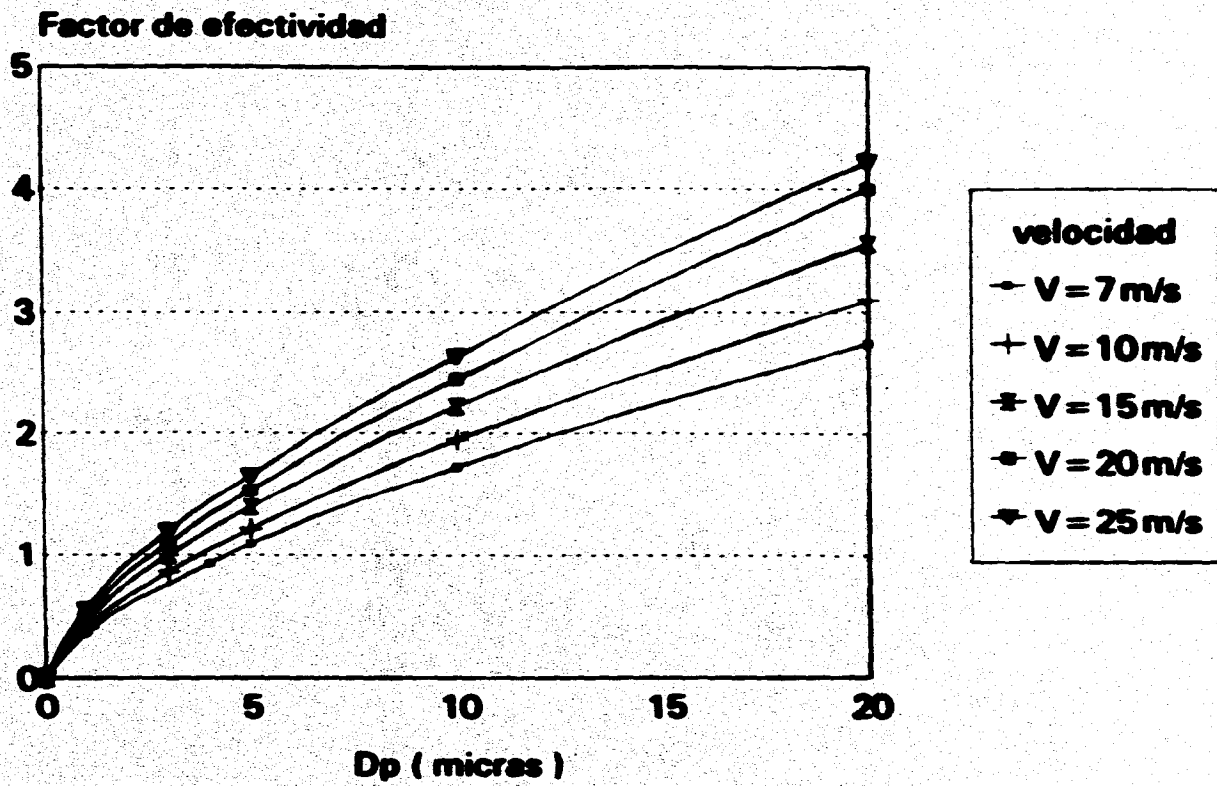
- Gráfica 3.5 Operación a diferente densidad de los gases.



- Gráfica 3.6 Operación a diferente velocidad de los gases.



- **Gráfica 3.7 Relación caída de presión - velocidad de los gases.**



- Gráfica 3.8 Rendimiento del colector a diferente Dp

El diseño final del ciclón se muestra en la figura 3.7, donde se establece un colector ciclónico de entrada tangencial estándar con aapa no expandida y de descarga axial simple a la atmósfera.

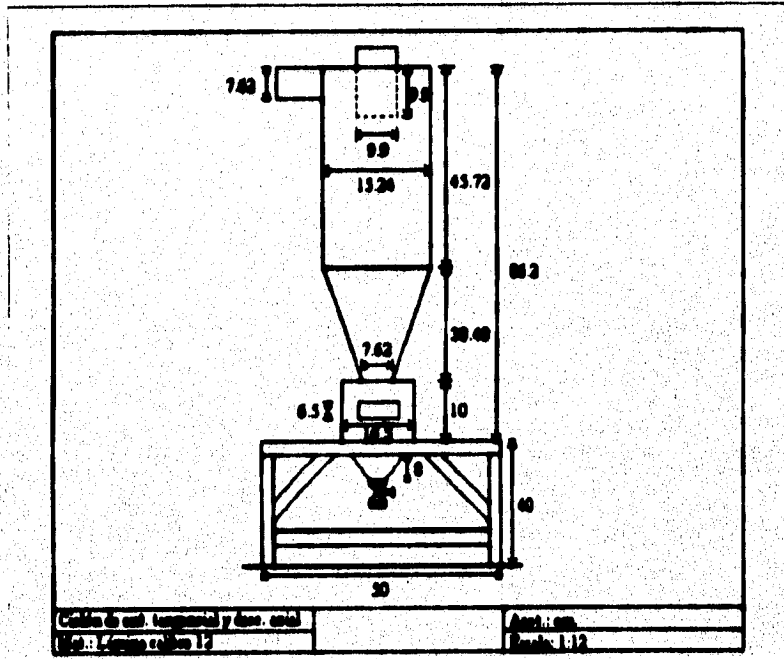


Figura 3.7 Esquema final del ciclón.



# **CAPITULO IV**

## PRUEBAS AL EQUIPO

La utilización de modelos matemáticos permiten predecir el comportamiento de un sistema con buena aproximación en condiciones estables de operación, lo cual no siempre sucede en la práctica debido a que además de los factores atmosféricos y las condiciones operativas reales, existen variables aleatorias que pueden presentarse y afectar al sistema de tal manera que presente un comportamiento totalmente fuera de lo previsto teóricamente y por ende repercute en el comportamiento del fenómeno analizado.

De acuerdo a lo anterior, el diseño efectuado para el colector ciclónico involucra además de la construcción del modelo la realización de experimentos que permitan evaluar su desempeño.

La experimentación prevista al ciclón esta basada en la implementación del aparato a motores diesel utilizados en los sistemas de transporte principalmente, pero no se descarta su uso en otros sistemas. Desafortunadamente la evaluación de los parámetros fundamentales para la obtención de los resultados experimentales que permitan analizar su rendimiento presenta dificultades ( con los equipos de medición disponibles ) por lo que se procederá a simular las emisiones con un turbosoplador que maneje velocidades de flujo similares a las de un motor diesel.

### 4.1 CARACTERISTICAS DEL TURBOSOPLADOR

Para la obtención de datos experimentales que representen el comportamiento del colector ciclónico se utilizo un turbosoplador, que simulará el flujo de emisiones de un motor diesel.

El turbosoplador utilizado se localiza en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería del la UNAM, teniendo las siguientes características:

- Turbosoplador de 5 HP con motor eléctrico de inducción.

Cuenta con tres relaciones de polea y una válvula reguladora de flujo, las relaciones de polea presentan las siguientes velocidades de rotación:

- a) 3100 r.p.m.
- b) 2600 r.p.m.
- c) 2100 r.p.m.

La válvula reguladora de flujo se utilizó a las siguientes posiciones:

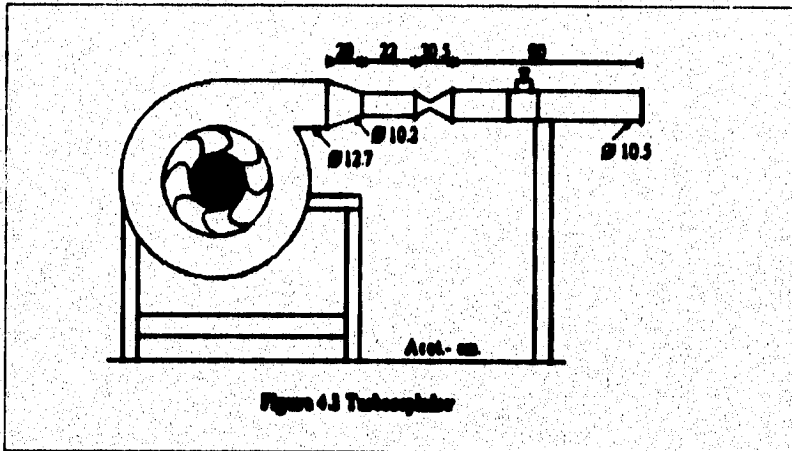
válvula completamente abierta.

$\frac{1}{2}$  de válvula abierta.

$\frac{1}{4}$  de válvula abierta.

$\frac{1}{8}$  de válvula abierta.

El turbosoplador utilizado presenta las siguientes dimensiones y cuenta con los accesorios mostrados en la figura 4.1.



## 4.2 ADAPTACION DEL CICLON AL TURBOSOPLADOR

La utilización del turbosoplador para la realización de pruebas al colector requirió de la implementación de un adaptador que acoplara la salida del turbosoplador con el ducto de entrada del ciclón, debido a que la relación de diámetros es  $\phi_{\text{sal turb.}} > \phi_{\text{ent. ciclón}}$  y que la altura del colector es mayor a la del ducto del turbosoplador.

La simulación del sistema de emisiones contaminantes requirió la implementación de un sistema de inyección de partículas ubicado en el adaptador ciclón-turbosoplador, para evitar la acumulación de partículas en los diferentes accesorios del turbosoplador, ocasionando pérdidas que provocarían una toma de lecturas erróneas.

El sistema de inyección consistió en un inyector localizado en la región cercana al codo superior, en la sección del adaptador que se acopló al ducto de entrada del ciclón, como se muestra en la figura 4.2.

En el sistema de inyección de partículas, éstas se introducen en el flujo por presión ( manual ), eliminándose así pérdidas debidas a los accesorios.

La longitud del tramo conector es la recomendada por la norma CCAT - FF - 001- A, que sugiere una longitud de 8 veces el diámetro del ducto, después de la última perturbación, para asegurar una estabilización del flujo y poder tomar lecturas confiables.

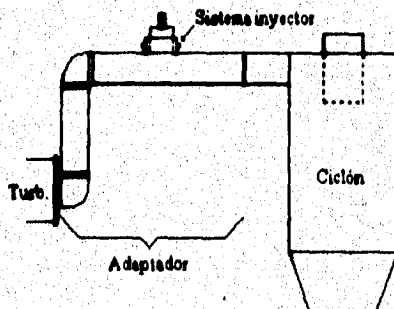


Figura 4.2 Adaptación ciclón-turbosoplador.

### 4.3 PRUEBAS REALIZADAS

El proceso de experimentación implica la medición de parámetros importantes que proporcionen la información necesaria para conocer el rendimiento del ciclón, entre los cuales resaltan:

- Velocidad del flujo.
- Presión total del flujo.
- Masa total de partículas inyectables.
- Masa de las partículas recolectadas.
- Diámetro de partículas.
- Tiempo de recolección.

Utilizando los siguientes equipos y materiales:

- Tubo de Prandtl.
- Anemómetro.
- Piezometro
- Balanza.
- Microscopio.
- Cronómetro.

Las pruebas se efectuaron utilizando las tres relaciones de polea y las cuatro aberturas de válvula reguladora de flujo antes mencionadas. El fluido manejado en el experimento fue aire a condiciones de temperatura ambientales ( 15 °C ) y se utilizaron tres tipos de partículas:

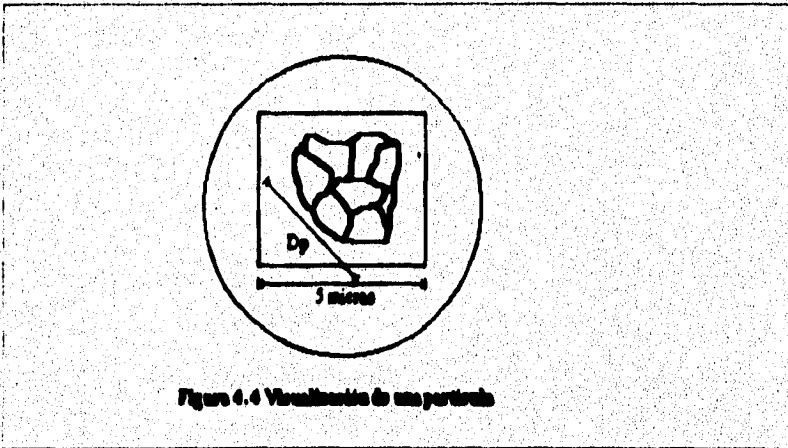
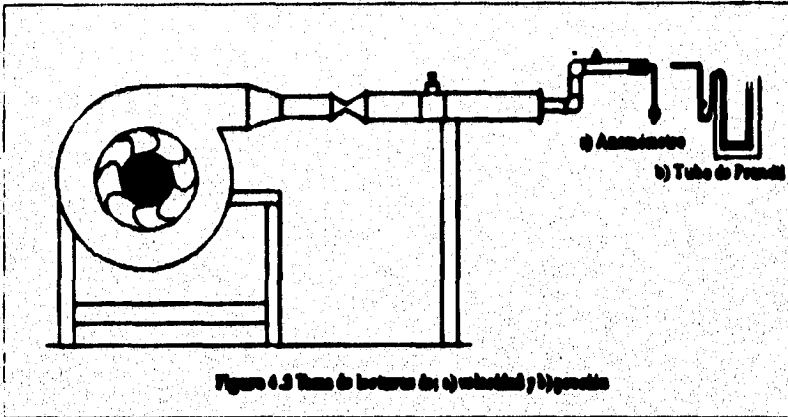
- Blanco de España
- Gis
- Talco

La velocidad del flujo se evalúa con el anemómetro ( directamente ), colocado axialmente en la región central de la descarga del tramo acoplador que conecta al adaptador y el ciclón, como se muestra en la figura 4.3 a.

La caída de presión del flujo se conoce a partir de la diferencia existente entre la presión total a la entrada del ciclón y la de salida del mismo en el tubo telescópico ( $P_{sum}$ ). Para lo cual se utiliza el tubo de Prandtl ( conectado al piezómetro ) colocado axialmente al flujo en la parte central de la descarga del tramo acoplador del adaptador ( figura 4.3 b ).

La medición de diámetro de las partículas se obtiene, utilizando el microscopio como medio visualizador del tamaño de los granos del material usado como partícula y

los intersticios de la malla patrón realizando una comparación entre ambos. Considerando como  $D_p$  a los granos más frecuentes de toda la muestra utilizada (Figura 4.4).



El tiempo de recolección se mide con un cronómetro, tomando el periodo de tiempo que transcurre desde que se inyectan las partículas hasta que se recolectan en la tolva de almacenamiento.

El arreglo turbocomplador-ciclón mostrado en la figura 4.5 muestra la colocación de los aparatos para efectuar las mediciones, mencionadas anteriormente, y poder evaluar la eficiencia de recolección a diferentes flujos y diámetros de partícula, así como la caída de presión que sufre el flujo en el colector y el tiempo que tarda el aparato en llevar a cabo la recolección.

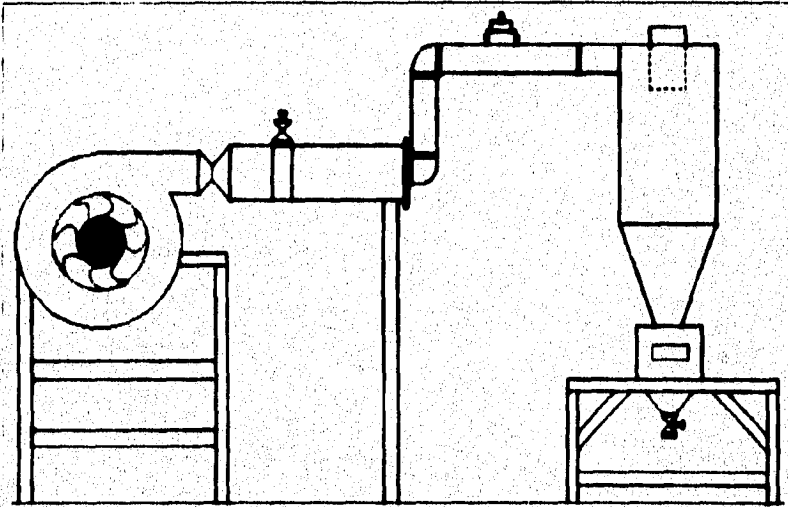


Figura 4.5 Operación del ciclón utilizando el turbocomplador

#### 4.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez realizada la experimentación y obtener los datos suficientes, para determinar el rendimiento del ciclón (eficiencia - caída de presión), se procede a obtenerlo.

La eficiencia de recolección se evalúa utilizando la masa de las partículas inyectadas y las recolectadas (previamente pesadas), por medio de la siguiente relación:

$$\eta = \frac{M_r}{M_i}$$

Donde:

$M_i$  - masa inyectable total

$M_r$  - masa recolectada

La caída de presión del flujo en el ciclón se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$\Delta P = P_{\text{ent. ciclón}} - P_{\text{sal. ciclón}} \text{ [ cm H}_2\text{O ]}$$

Con las mediciones realizadas se obtuvieron las siguientes tablas de resultados para cada una de las diferentes partículas utilizadas ( tablas 4.1, 4.2, 4.3 ).

Tabla 4.1 Resultados del Blanco de España usado como partícula  
 $D_p \cong 9 \mu\text{m}$ .

Vel. (m/s)	$M_{\text{iny}} \text{ (gr)}$	$M_{\text{rec}} \text{ (gr)}$	Tiempo (s)	$\Delta P \text{ (cmH}_2\text{O)}$	$\eta \text{ (\%)}$
8	20	11	30	0.5	55
13	20	12	28.5	0.8	60
16	20	12	27.4	1.3	62.5
21	20	13	27	2.0	65
22	20	13.5	26.4	2.5	67.5
24	20	14	26.2	3.0	70
26	20	14.5	25.5	3.0	72.5
28	20	15	25.3	4.5	75
30	20	15.5	25.1	5.0	77.5
32	20	15.5	25	5.0	77.5
34	20	16	24.5	5.5	80
39	20	17.5	24	8.0	87.5



**Tabla 4.2 Resultados del polvo de Gis utilizado como partícula**  
 $D_p \cong 14 \mu\text{m}$ .

Vel. ( m/s )	$M_{\text{iny}}$ ( gr )	$M_{\text{rec}}$ ( gr )	Tiempo ( s )	$\Delta P$ ( cmH <sub>2</sub> O )	$\eta$ ( % )
8	20	13	30	0.5	65
13	20	14	28.5	0.8	70
16	20	14.5	27.4	1.3	72.5
21	20	15	27	2.0	75
22	20	15	26.4	2.5	75
24	20	15.5	26.2	3.0	77.5
26	20	15.5	25.5	3.0	77.5
28	20	16	25.3	4.5	80
30	20	16	25.1	5.0	80
32	20	16.5	25	5.0	82.5
34	20	17	24.5	5.5	85
39	20	18.5	24	8.5	92.5

**Tabla 4.3 Resultados del Talco utilizado como partícula**  
 $D_p \cong 3 \mu\text{m}$ .

Vel. ( m/s )	$M_{\text{iny}}$ ( gr )	$M_{\text{rec}}$ ( gr )	Tiempo ( s )	$\Delta P$ ( cmH <sub>2</sub> O )	$\eta$ ( % )
8	20	10	30	0.5	50
13	20	11	28.5	0.8	55
16	20	11	27.4	1.3	55
21	20	11.5	27	2.0	57.5
22	20	12	26.4	2.5	60
24	20	12.5	26.2	3.0	62.5
26	20	13.5	25.5	3.0	67.5
28	20	13.5	25.3	4.5	67.5
30	20	14	25.1	5.0	70
32	20	14.5	25	5.0	72.5
34	20	15	24.5	5.5	75
39	20	16	24	8.0	80

## 4.5 RESULTADOS GRAFICOS

En la presente sección se muestran las gráficas representativas del colector, en las cuales se puede observar el rendimiento del mismo a diferentes condiciones operativas.

Analizando la gráfica 4.1 se observa que la eficiencia de recolección con un tamaño de partícula de  $9 \mu\text{m}$  (Blanco de España) es aceptable para velocidades superiores a  $30 \text{ m/s}$ , debido a que la eficiencia alcanza valores aproximados al  $80\%$  o superiores a éste. El comportamiento que presenta el ciclón muestra una tendencia ascendente, es decir, que a una mayor velocidad existe una mayor eficiencia, por lo cual suponemos que a incrementos de velocidad mayores a  $39 \text{ m/s}$  la eficiencia se incrementará.

Analizando la gráfica 4.2 se observa que la eficiencia de recolección con un tamaño de partícula de  $14 \mu\text{m}$  (polvo de gis) es aceptable para velocidades superiores a  $25 \text{ m/s}$ . El comportamiento que presenta el ciclón muestra una ligera tendencia a la estabilización en un rango de velocidad de  $13$  a  $26 \text{ m/s}$  (la eficiencia no sufre cambios significativos), pero cuando la velocidad es mayor a  $26 \text{ m/s}$  la tendencia es ascendente, por lo cual suponemos que incrementando la velocidad en valores superiores a  $39 \text{ m/s}$  la eficiencia tenderá a un valor estable.

Analizando la gráfica 4.3 se observa que la eficiencia de recolección con una tamaño de partícula de  $3 \mu\text{m}$  (talco) es aceptable para velocidades superiores a  $35 \text{ m/s}$ . El comportamiento que muestra el ciclón presenta una tendencia estable en un rango de  $8$  a  $20 \text{ m/s}$ , para un rango de  $21$  a  $26 \text{ m/s}$  existe una tendencia ascendente, pero en el rango de  $28$  a  $39 \text{ m/s}$  presenta un comportamiento lineal de pendiente positiva. Por lo que suponemos que a incrementos de velocidad mayores a  $39 \text{ m/s}$ , la eficiencia tenderá a estabilizarse paulatinamente.

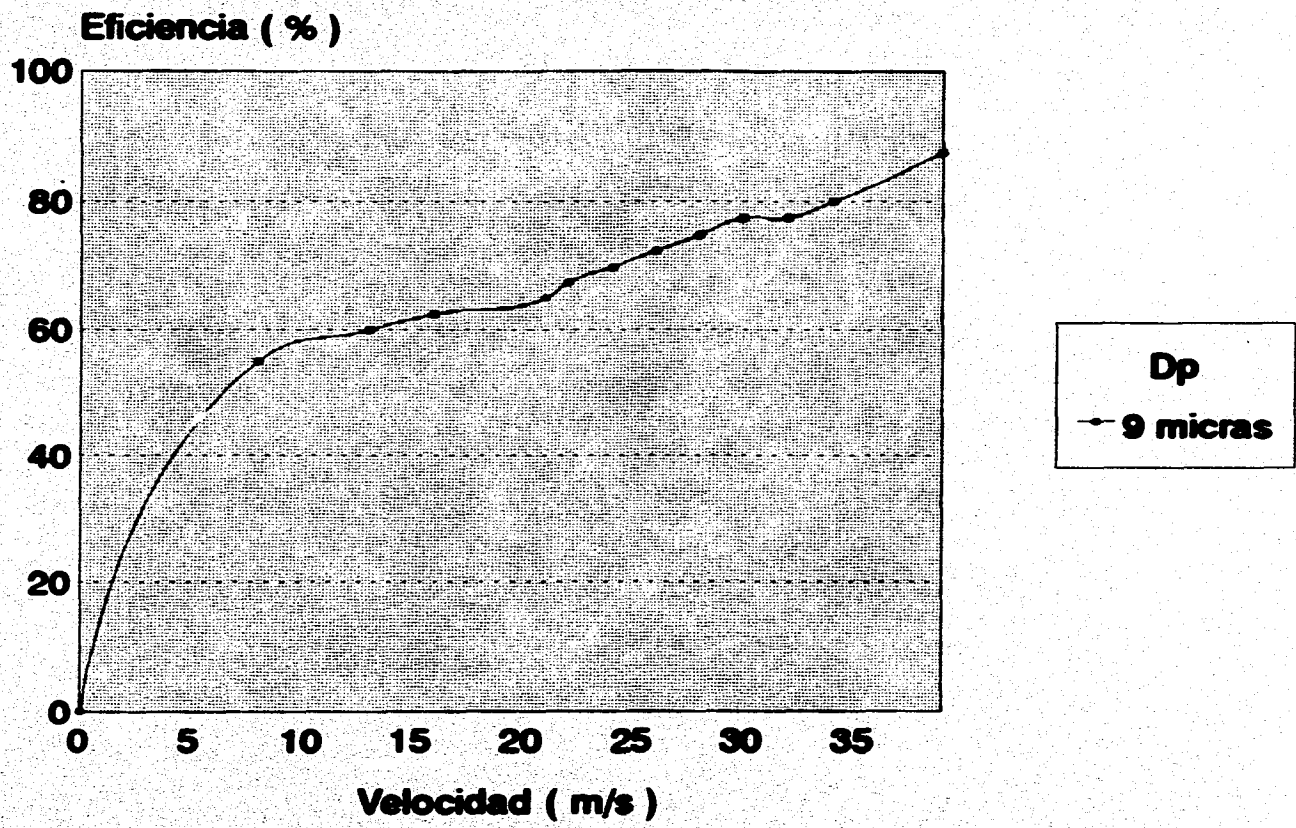
Comparando las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3 se observa que el colector presenta mejor eficiencia a medida que el tamaño de las partículas aumenta, debido en gran medida a que partículas con diámetros muy pequeños ( $D_p \cong 3 \mu\text{m}$ ) tienden a seguir la trayectoria del remolino generado dentro del cuerpo del ciclón.

La gráfica 4.4 muestra la variación de la eficiencia con respecto al diámetro de partícula a diferentes velocidades de flujo. Se observa que a velocidades de  $8$  a  $21 \text{ m/s}$  la eficiencia presenta una cierta estabilización, la cual no sufre cambios significativos a medida que aumenta el diámetro de la partícula. A velocidades de  $30$  a  $39 \text{ m/s}$  la eficiencia presenta una estabilización con diámetros de partícula superiores o iguales a  $5$  micras. Además se puede apreciar que el colector presenta buena operatividad ( $\eta = 80\%$ ) para diámetros de partícula superiores a  $5 \mu\text{m}$  y velocidades mayores o iguales a  $30 \text{ m/s}$ .

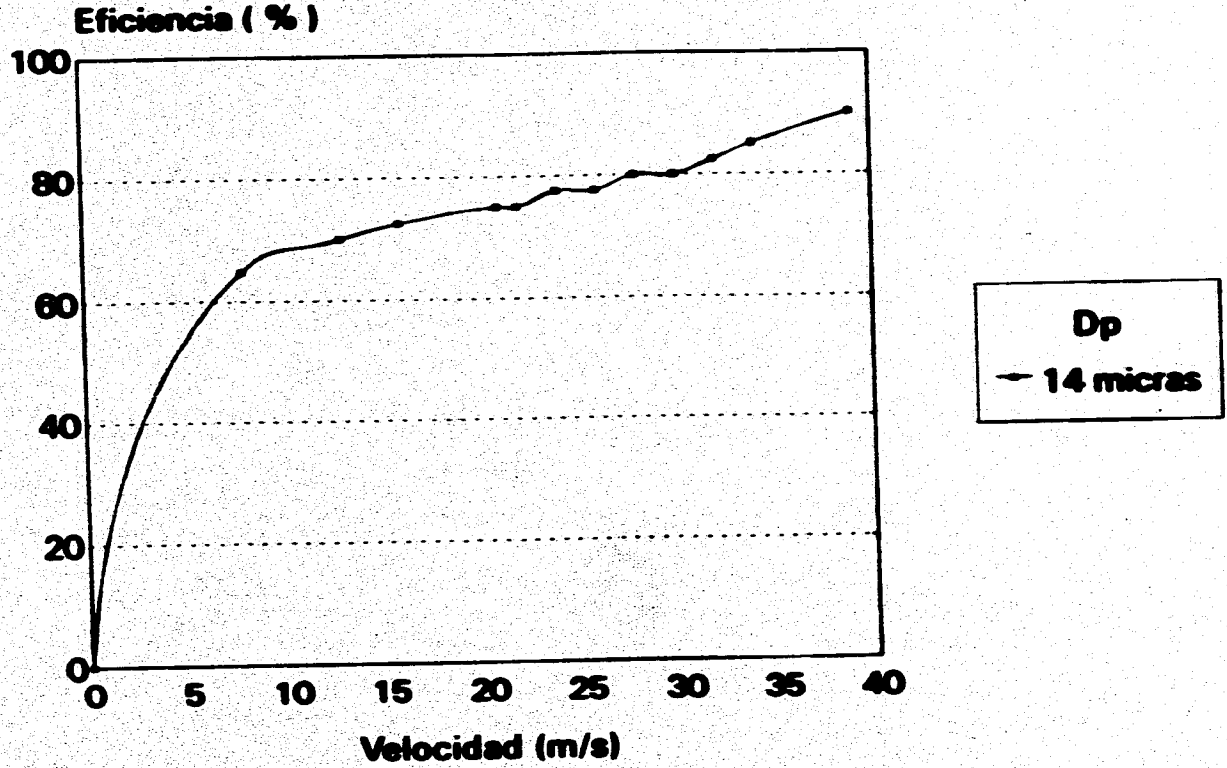
La gráfica 4.5 muestra la variación de la caída de presión con respecto de la velocidad de flujo. Se observa un comportamiento del tipo exponencial a velocidades de 0 a 21 m/s y 32 a 39 m/s, con presencia de fluctuaciones en el rango de 21 a 30 m/s.

La gráfica 4.6 muestra la variación de la eficiencia con respecto de la caída de presión (rendimiento del colector) a diferentes diámetros de partícula. Se observa un comportamiento lineal de pendiente positiva para el rango de 2 a 8 cm H<sub>2</sub>O, por lo que la eficiencia aumenta a medida que se incrementa la caída de presión existente en el ciclón. Además se puede observar que el ciclón presenta un rendimiento aceptable para tamaños de partícula superiores a 5  $\mu\text{m}$  y caídas de presión superiores a 5 cm de H<sub>2</sub>O (30 m/s).

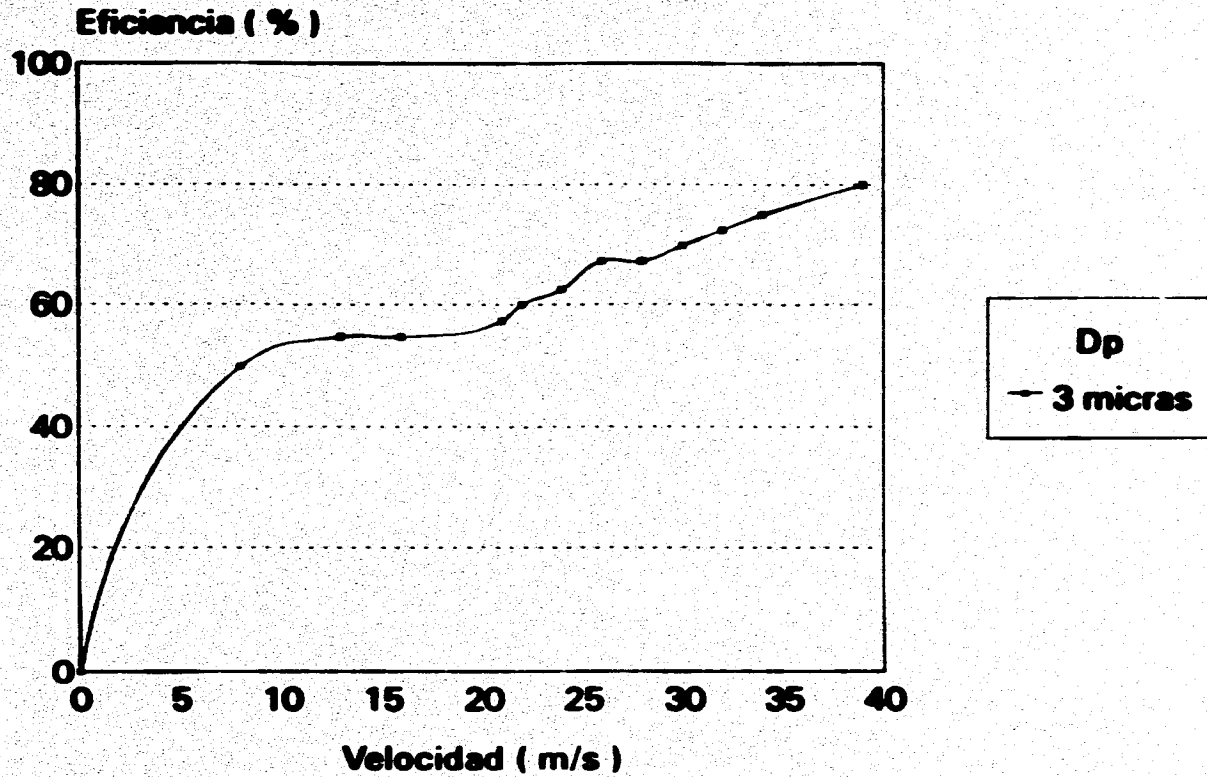
Relacionando las gráficas anteriores se puede afirmar que a grandes aumentos en la velocidad de flujo de emisiones existirá un ligero incremento en la eficiencia, no importando el tamaño de la partícula que se maneje.



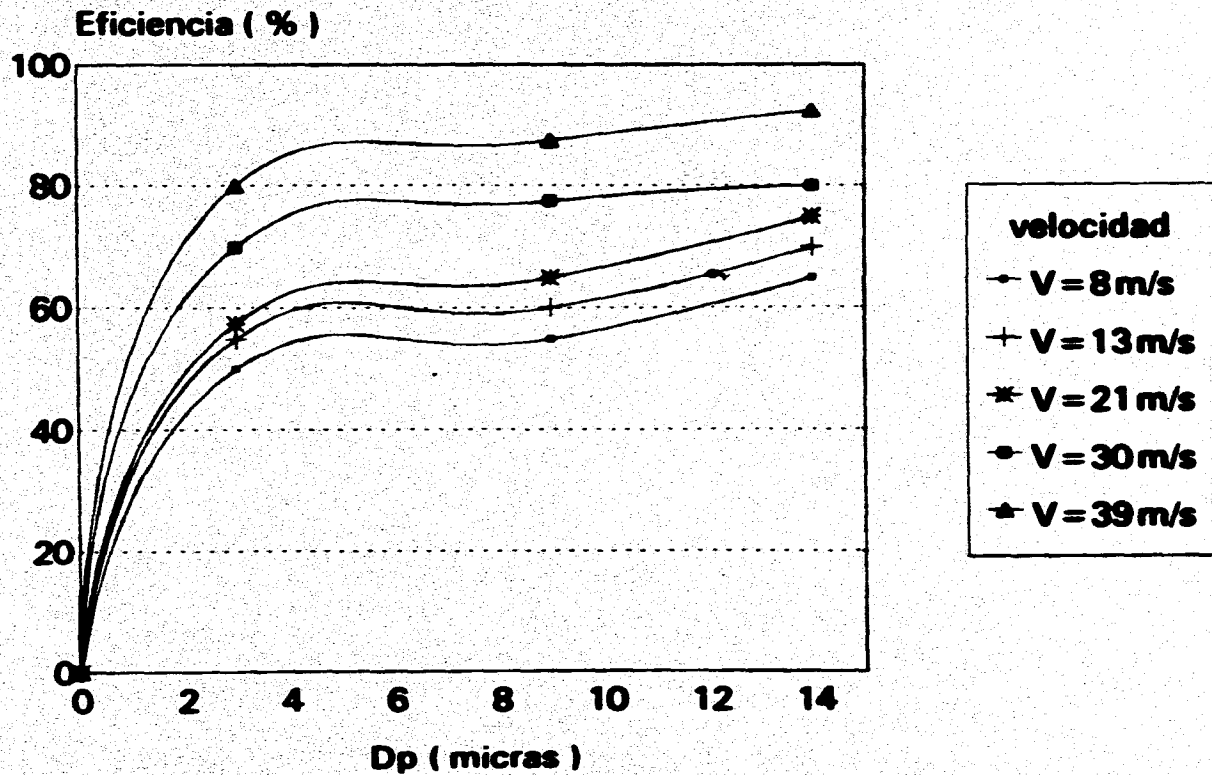
**Gráfica 4.1 Blanco de España como partícula.**



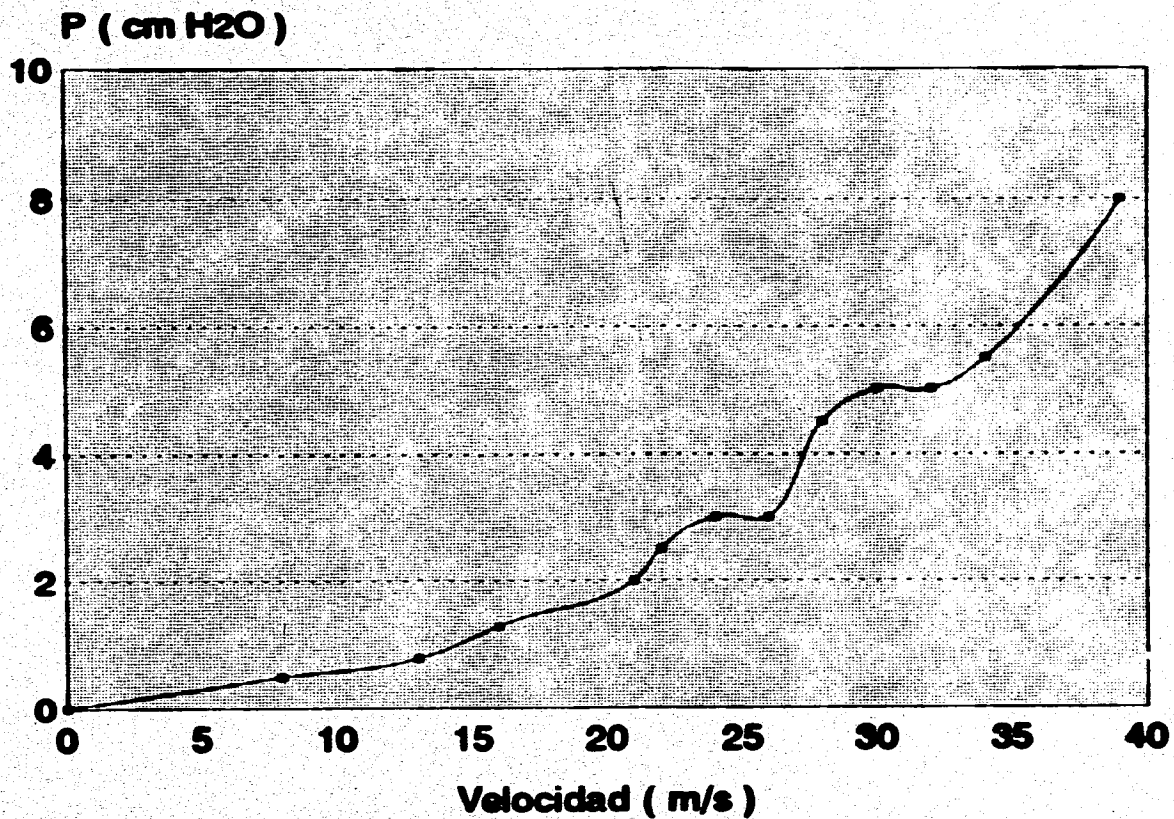
- Gráfica 4.2 Utilización de Gis como partícula.



- Gráfica 4.3 Utilización de Talco como partícula.

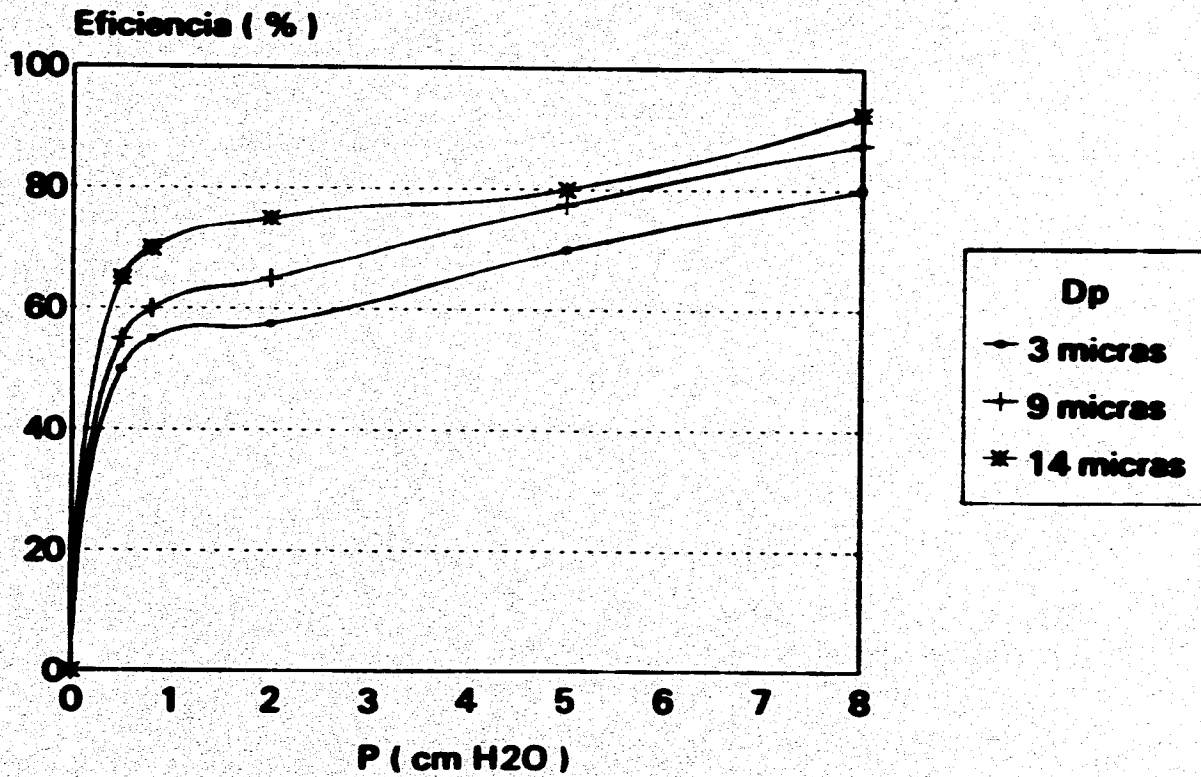


- Gráfica 4.4 Comportamiento a diferente velocidad de flujo.



- Gráfica 4.5 Relación de caída de presión con velocidad de flujo.





- Gráfica 4.6 Rendimiento del ciclón a diferente D<sub>p</sub>.

# **CAPITULO V**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

El comportamiento que presenta el colector de partículas a diferentes velocidades de flujo, muestra rendimientos bastante aceptables ( $\eta > 80\%$  y  $\Delta P < 29.4 \text{ cm H}_2\text{O}$ ) para velocidades superiores a 30 m/s y con diámetros de partícula mayores a  $5 \mu\text{m}$  como lo muestran los resultados obtenidos en las gráficas 4.4 ( $\eta$  v.s  $D_p$ ) y 4.6 ( $\eta$  v.s  $\Delta P$ ).

El sistema propuesto para la eliminación de partículas solo debe utilizarse (de acuerdo a las condiciones en que fue sometido el ciclón) para casos en donde la velocidad de los gases de escape del motor diesel sea igual o superior a 30 m/s, pero si la velocidad es menor a 30 m/s debe utilizarse como un sistema de precolección de partículas.

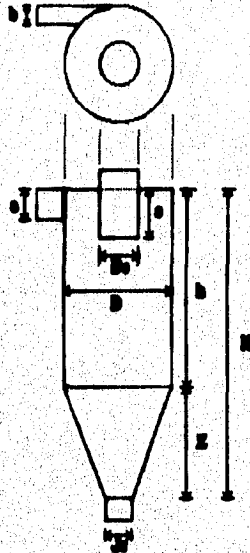
De acuerdo a los resultados obtenidos, la eficiencia y caída de presión son diferentes (bajas) con respecto a los teóricos, debido a la diferencia operativa existente entre lo diseñado y lo realizado experimentalmente, como se enuncia a continuación:

- El diseño de la entrada de agua no expandida disminuye la pérdida por presión, pero también disminuye la eficiencia de recolección.
- Temperatura de operación en el ciclón fue aproximadamente de  $15^\circ\text{C}$  (menor a la de diseño), con lo cual aumenta la viscosidad y densidad del fluido, ocasionando así una disminución considerable en la eficiencia de recolección.
- Densidad del fluido de trabajo (aire) menor a la de diseño, que no repercute en la eficiencia, pero sí provoca una disminución en la caída de presión.
- Existencia de imperfecciones en las uniones de las paredes del ciclón atenúan el remolino generado en el cuerpo del colector, disminuyéndose la eficiencia y caída de presión.

Existen otros factores que repercuten en la eficiencia y caída de presión del ciclón, éstos son de carácter geométrico:

- A un aumento en  $[D_c]$  implica una disminución en la eficiencia (pequeña) y caída de presión (considerable).
- A un aumento en  $[b]$  implica una disminución considerable en la eficiencia y caída de presión.

- A un aumento en [  $s$  ] implica un pequeño incremento en la eficiencia.
- A un aumento en [  $J_s$  ] implica un pequeño incremento en la eficiencia.
- A un aumento en [  $h$  ] implica un incremento en la eficiencia.
- A un aumento en [  $h_{\text{cono}}$  ] implica una ligera disminución en la eficiencia.



Configuración del colector

## 5.2 RECOMENDACIONES

El mejor funcionamiento del ciclón ( según los resultados obtenidos ) se tiene cuando se utilizan velocidades de flujo superiores a 30 m/s, con partículas de diámetro mayor a 5  $\mu\text{m}$ . Pero se recomienda probar el ciclón en el escape del motor diesel antes de utilizarlo como sistema de control de emisiones.

Para mejorar la funcionalidad del colector ciclónico se recomiendan los siguientes aspectos:

- Ubicar una compuerta en la tolva de almacenamiento, localizada en la pared donde se encuentra la mirilla, con la finalidad de efectuar una limpieza en la tolva y mirilla (para tener una buena visibilidad al interior de la tolva de recolección ).
- La válvula de descarga presenta características de poca funcionalidad, debido a que la existencia de una presión parcial de vapor de líquido contenido en el flujo de gases, se condensa y se mezcla con las partículas creando una aglomeración de las mismas, ocasionando una obstrucción en la descarga de los polvos. Lo mas recomendable en estos casos es implementar un tapón para evitar complicaciones.
- Aplicar un recubrimiento anticorrosivo en las paredes internas del ciclón, para evitar el desgaste debida a la erosión producida por las partículas, disminuyendose así la eficiencia de recolección y caída de presión.
- La descarga de polvos se debe efectuar de acuerdo con la concentración de partículas contaminantes, flujo de gases, tiempo de operación del colector y dimensiones de la tolva de almacenamiento. Sugiriéndose una descarga de polvos para los siguientes tiempos de operación:

V ( m/s )	8	13	21	30	39
t ( min )	280	180	140	90	60

- Las paredes del colector sufren un calentamiento debido al manejo de gases de escape, por lo cual deben utilizarse materiales resistentes a altas temperaturas. También es conveniente aislar térmicamente al colector para evitar posibles accidentes.

Antes de utilizar el ciclón deben considerarse los siguientes aspectos:

- Obtención de datos suficientes sobre el proceso.
- Cantidad de contaminantes emitidos.

- **Composicion de los contaminantes en el escape.**
- **Gasto volumétrico de emisiones.**
- **Temperatura y presiones del flujo de las emisiones.**
- **Características de los contaminantes.**
- **Concentración de los contaminantes.**

## BIBLIOGRAFIA

1. - **Engineering control of air pollution, vol IV.**  
Arthur C. Stern.  
Edit. - Academic Press.
2. - **Air pollution control engineering.**  
W. Licht.  
Edit. - Marcel Dekker, Inc.
3. - **Handbook of air pollution technology.**  
Seymas Calvert and Harold Englund.  
Edit. - John Wiley & Sons.
4. - **Biblioteca del ingeniero químico, vol. V.**  
Robert Perry y Cecil H. Chilton
5. - **Suplement to measurements, monitoring, surveillance, an engineering control, vol. VI.**  
Arthur C. Stern.  
Edit. - Academic Press.
6. - **Fundamentals of air pollution engineering.**  
Flagan and Seinfeld.  
Edit. - Prentice Hall.
7. - **La industria y la contaminación del aire.**  
R. D. Ross.  
Edit. - DIANA.
8. - **Contaminación del aire por la industria.**  
Albert Parker.  
Edit. - DIANA.
9. - **Programa integral contra la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de la ciudad de México.**  
Rodolfo Lacy.  
Comisión metropolitana para la prevención y control de la contaminación ambiental en el valle de México.
10. - **La ciudad de México y la contaminación atmosférica.**  
Quadri Sánchez.  
Edit. - LIMUSA.

- 11.- Contaminación del aire, origen y control  
Kennet Wark y Cecil F. Warner  
Edit.- LIMUSA.
- 12.- Air quality.  
Thad Godish.  
Edit.- Lewis publishers.
- 13.- Marks, Manual del ingeniero mecánico, vol. III.  
Theodore Baumeister, Eugene A. Avallone y Theodore Baumeister III.
- 14.- Practical Handbook of enviromental control.  
Conrad P. Straub.  
Edit.- CRC.
- 15.- Ecología, contaminación, medio ambiente.  
Turk, Turk, Witter.  
Edit.- Interamericana.
- 16.- Manual para el control de la contaminación industrial.  
F. Lund.  
Edit.- Instituto de estudios de administración local.
- 17.- Norma SEDUE ( CCAT - FF - 001 - A )  
Subsecretaría de ecología.  
Dirección general de prevención y control de la contaminación ambiental .
- 18.- Ingeniería termodinámica.  
M. David Burghardt.  
Edit.- HARLA.