628.54
PER
C2

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Cálculo y Diseño Fluidodinámico de un Filtro de Mangas (Tipo Pulse Jet) Para Partículas Minerales de Origen Industrial"

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Germán Petronius Peralta Castillo

Guayaquil - Ecuador

Año - 2001

ESPOL
CIB
D-26909

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Alfredo Barriga por su invaluable dirección y apoyo así como a las personas que de una u otra manera colaboraron para la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A DIOS

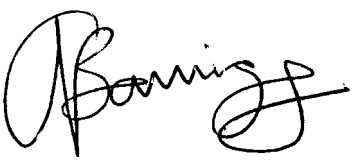
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI TIA ROSARIO

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Mario Patino A.
SUBDECANO FIMCP



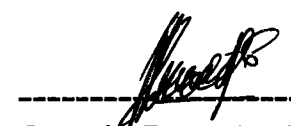
Dr. Alfredo Barriga R.
Director de Tesis

Ing. Rodolfo Paz M.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Germán Petronius Peralta Castillo

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño fluidodinámico de un filtro de mangas para partículas minerales de origen industrial con su utilización en el control de la contaminación industrial del aire y como medio de recuperación de materia prima o de prodúcto terminado, tratando de ajustar este diseño a las condiciones locales y a las necesidades de nuestro país.

La primera parte versa sobre los fundamentos teóricos de la dinámica de partículas y del mecanismo de filtrado necesarios para determinar la forma y el método de captación del material particulado.

Para desarrollar la evaluación de los criterios de diseño se realizarán las mediciones de las variables de entrada necesarias tales como caída de presión, temperatura, caudal, concentración de partículas, masa, eficiencia de filtrado, etc. Y así obtener el mejor diseño posible que cumpla con las expectativas de utilización.

Finalmente los resultados obtenidos en esta división del diseño serán aplicados al desarrollo del diseño mecánico determinando las geometrías reales del mismo.

INDICE GENERAL

Pag.

RESUMEN.....II

INDICE GENERAL.....III

ABREVIATURAS.....IV

SIMBOLOGIA V

INDICE DE TABLAS.....VI

INDICE DE FIGURAS.....VII

INDICE DE PLANOS VIII

INTRODUCCION

CAPITULO I

CONTROL DE LA CONTAMINACION INDUSTRIAL.....18

1.1 Breve Historia del Control de la Contaminación Industrial del Aire..21

1.2 Leyes y Reglamentos Acerca del Control de la Contaminación Industrial del Aire en la Ciudad de Guayaquíl.....23

1.3 Equipos Y Métodos de Medición de la Contaminación por Material Particulado.....25

1.4 Definición del Problema.....29

1.5 Métodos para el Control de la Contaminación Industrial del Aire.....33

1.6 Utilización del Modelo como Medio de Recuperación de Materia Prima o Producto Terminado....36

CAPITULO II

TEORIA DE PARTICULAS Y MEDIO FILTRANTE....38

2.1 Comportamiento de las Partículas en Fluidos 39

2.1.1 Fuerza de Arrastre....41

2.1.2 Fuerza de Buoyantes....44

2.1.3 Fuerza Gravitacional....46

2.1.4 Fuerzas Externas....47

2.2 Balance de Fuerzas en una Partícula....47

2.3 Tratamiento Matemático de Datos....50

2.3.1 Obtención del Diámetro de Partícula Característico....53

2.4 Mecanismo de Colección de Partículas....55

2.5 Características y Tipos de Medios Filtrantes....57

CAPITULO III

BASES TEORICAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRADO....61

3.1 Determinación del Modelo Matemático del Mecanismo de Filtrado.64

3.1.1 Velocidad de Filtración (relación gas - tela)....70

3.1.2 Eficiencia de Colección....70

3.2 Descripción General del Sistema de Filtración por Mangas....71

3.2.1 Cuerpo Principal....72

3.2.2 Sistema de Mangas....73

3.2.3 Sistema de Limpieza de Mangas....73

3.2.4 Colector de Partículas....77

3.2.5 Sistema de Succión....78

CAPITULO IV

DISEÑO DEL FILTRO....81

4.1 Descripción de los Criterios de Diseño....82

4.2 Evaluación de los Criterios de Diseño....91

4.2.1 Determinación del Tipo, Forma y Capacidad....91

4.2.2 Selección del Medio Filtrante....93

4.2.3 Determinación del Número de Mangas....94

4.2.4 Análisis del Sistema de Limpieza Pulse – Jet....95

4.2.5 Determinación de la Caída de Presión de Diseño....97

4.3 Evaluación del Sistema de Succión....98

4.4 Tabulación de Resultados....99

CAPITULO V

ANALISIS EXPERIMENTAL....101

5.1 Características del Prototipo....102

5.2 Datos y Resultados Obtenidos en la Prueba Experimental....104

5.2.1 Obtención de Caudal....105

5.2.2 Obtención de la Concentración de Entrada....107

5.2.3 Prueba de Filtración para Determinar las Constantes ke y ks.....109

5.2.4 Determinación de la Eficiencia Promedio de Recolección y Tiempo de Filtración.....112

5.2.5 Determinación de la Eficiencia de Colección Total.....116

5.3 Calculo de la Caída de Presión Real.....117

CAPITULO VI

ANALISIS DE COSTOS.....119

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APENDICES

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURAS

A_{manga}	Area de Cada Manga
Atm	Atmósfera
Hp	Caballos de Fuerza
cm^2	Centímetro Cuadrado
cm^3	Centímetro Cúbico
Ci	Concentración de Partículas a la entrada
Co	Concentración de Partículas a la Salida
dp	Diámetro de Partícula
EPA	Environmental Protection Agency
Cf	Factor de Corrección de Cunnigham
Fd	Fuerza de Arrastre
Fb	Fuerza de Buoyantes
Fg	Fuerza Gravitacional
Fr	Fuerza Resultante
°C	Grado Centígrado
°K	Grado Kelvin
g	gramo
gr	grano
gr/pie^3	Grano por Pie Cúbico
h	Hora
Kg	Kilogramo
Kw-h	Kilovatio-hora
Lt/min	Litro por minuto
mp	Masa de Partículas
Mpa	Megapascal
m^3	Metro Cúbico
m^3/s	Metro Cúbico por Segúndo
µg	Microgramo
µm	Micrómetro
ms	Milisegúndo
min	Minuto
N_{mangas}	Número de Mangas
Re	Número de Reynolds
ppm	Parte por Millón

PM10	Partículas Menores a 10 Micras
Pa	Pascal
Mi	Peso Molecular de Contaminante
cfm	Pie Cúbico por Minuto
P	Presión
plg H2O	Pulgadas de Agua
s	Segundo
T	Temperatura
Ton	Tonelada métrica
Vt	Velocidad de Asentamiento
Vf	Velocidad de Filtración (Relación Gas – Tela)
Vp	Velocidad de Partícula
Vg	Velocidad del Gas

SIMBOLOGIA

A_n	Area Neta de Filtración
ΔP	Caída de Presión Total
ΔPf	Caída de Presión a Través de Tela Limpia
ΔPp	Caída de Presión a Través de Pastel
ΔPs	Caída de Presión a Través de Estructura
Cd	Coeficiente de Arrastre
C	Concentración
Ke	Constante de Extrapolación en Gráfica W vs. S
ρ_g	Densidad del Gas
ρ_L	Densidad de Capa de Polvo
ρ_p	Densidad de Partícula
ν	Densidad Relativa
W	Densidad de Area de Capa de Polvo
σ	Desviación Estándar
σ_g	Desviación Estándar Geométrica
ϕ	Diámetro
η	Eficiencia
η_o	Eficiencia de Colección
η_r	Eficiencia de Recuperación
f	Función
m_p	Flujo másico de Partículas
g	Gravedad
Log	Logaritmo de Base 10
L	Longitud
Kf	Permeabilidad de Tela
Kp	Permeabilidad de Capa de Polvo
Ks	Pendiente en Gráfica W vs. S
π	Pi = 3.1416
Df	Profundidad de Tela
Dp	Profundidad de Capa de Polvo
Q	Relación de Flujo Volumétrico
Q_p	Relación de Flujo Volumétrico de Prototipo
$\sum F$	Sumatoria de Fuerzas
θ	Tiempo de Filtración
dv/dt	Variación de Velocidad con respecto al Tiempo
σ^2	Varianza
μ_g	Viscosidad Absoluta del Gas

INDICE DE TABLAS

Tabla		Pág
I	Tabla de Valoración para Selección del Equipo Adecuado	36
II	Valores de C_f Para Aire a Presión Atmosférica	44
III	Datos de Tamaño y Fracción de Masa de partículas	54
IV	Tabla de Valoración para Selección del Sistema de Limpieza	79
V	Resultados de las Características de Diseño del Filtro	100
VI	Mediciones de Velocidad para Cinco Tomas	106
VII	Datos de Medición de la Masa Promedio en Papel Filtro para la Obtención de Concentración a la Entrada	108
VIII	Datos de Caída de Presión Obtenidos Durante la Prueba de Filtración para Siete Intervalos de Filtración	110
IX	Datos de Pesaje de Masa en Tanque y Tolva	114
X	Resultados de Eficiencias a Diferentes Tiempos de Filtración	114
XI	Datos de Medición de la Masa Promedio en Papel Filtro para la Obtención de Concentración a la Salida.	116
XII	Materiales Utilizados y sus Precios	121

INDICE DE FIGURAS

Figura		Pág
1.1	Impactador de Cascada	28
1.2	a) Impactador de Micro-Orificio, b)Ciclón en Cascada	29
1.3	Diagrama Esquemático de Formulación del Problema	30
2.1	Coeficiente de Arrastre Para una Esfera Lisa en Función del Número de Reynolds.	40
2.2	Fuerza de Arrastre	42
2.3	Efecto de la Sustentación en Diferentes Fluidos	45
2.4	Balance de Fuerzas	48
2.5	Mecanismos que Actúan en la Filtración: a) Impactación por Inercia; b) Intersepción Directa; c) Difusión.	56
2.6	Tejido de Tela Cruzada	58
2.7	Filtro de Fieltro	59
3.1	Proceso de Filtración	62
3.2	Curva Típica de Funcionamiento	69
3.3	Funcionamiento del sistema se limpieza pulse – jet	77
5.1	a) Electroválvula de ½ plg.; b) Control de Prototipo	103
5.2	Comportamiento de la Formación del Pastel a Través del Aumento del Arrastre en las Partículas	111
5.3	Gráfica del Punto Óptimo de Operación	115

INDICE DE PLANOS

Plano	
1	Prototipo del Filtro de Mangas Pulse - Jet

INTRODUCCION

El presente trabajo trata el cálculo y diseño fluidodinámico de un filtro de mangas tipo "pulse-jet " para partículas minerales de origen industrial incluyendo materia particulada de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm (PM10), con el objetivo de controlar la contaminación industrial del aire y recuperar material antes de expulsar el gas hacia la atmósfera por lo cual este equipo es usado como parte del proceso industrial en la obtención de polvos.

El filtro es diseñado para una eficiencia de filtración del 99.9% y la calidad del aire debe estar dentro de los estándares nacionales de calidad. El desarrollo de este trabajo se basa en la investigación bibliográfica y electrónica (Internet) para entender los principios fluidinámicos básicos y obtener los criterios de diseño, que son corroborados a través del desarrollo de un prototipo utilizado para el análisis experimental en el cual se determinará la característica principal del filtro (consntante Ks), la eficiencia de filtración y de colección y el ciclo de limpieza adecuado para una optima operación del mismo.

CAPITULO I

1. CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL

El desarrollo industrial ha generado consigo la contaminación del medio ambiente la cual es un serio problema para la vida humana, animal y vegetal; en el pasado, la industria, la agricultura y contaminadores individuales consideraban que era más económico descargar a la atmósfera los desechos antes que controlarlos sin considerar sus efectos posteriores sobre las personas y su medio de vida (8). En la actualidad tenemos grandes problemas de contaminación industrial que ha obligado al ente industrial a tener una nueva perspectiva sobre el uso del medio ambiente como un sumidero para los desechos industriales.

La contaminación del aire forma parte de la vida moderna, es el resultado de la emisión de gases contaminantes de fuentes estacionarias (ej.: industrias), como de fuentes móviles (ej.: automóviles). La preocupación actual es tratar de reducir la

concentración de contaminantes en la atmósfera controlando la emisión de los mismos después de que se haya generado, es decir, durante el proceso, a través de equipos de control, ó aplicando la prevención que es la utilización de materiales, procesos y métodos que reduzcan o eliminen la producción de desechos en el mismo punto donde se generan. Las entidades gubernamentales como La EPA (Environmental Protection Agency), controlan o limitan las emisiones instantáneas de varias fuentes tanto industriales como no industriales a través de regulaciones estandarizadas como son la "*emisión estándar*" y el *"estándar de calidad del aire"*.

En este trabajo se utiliza el control como medio para reducir la contaminación del aire por partículas minerales que tienen un diámetro aerodinámico promedio alrededor de 10 μm; el control racional de la contaminación del aire se fundamenta en cuatro suposiciones básicas (8):

a.- El aire es de dominio público: Esta suposición es considerada al tratar la contaminación del aire como un problema público, concerniente no solo a quienes la producen sino también a quienes sufren las consecuencias.

b.- La contaminación del aire constituye un concomitante inevitable de la vida moderna: Se necesita establecer sistemáticamente normas y

programas a fin de conservar la atmósfera para que cumpla su función biológica más esencial.

c.- Se pueden aplicar los conocimientos científicos para delinear las normas públicas: se debe trabajar mucho a fin de crear dispositivos y métodos de control para lograr reducciones considerables en los niveles de contaminación del aire.

d.- Los métodos para reducir la contaminación del aire no deben aumentar dicha contaminación en otros sectores del ambiente: Al tratar de solucionar un problema no debemos empeorar otro, por lo tanto ciertos materiales que se pueden recopilar en el proceso de control de contaminación se los puede reciclar al proceso industrial.

En industrias que producen polvos como en cementos, talcos, harinas, pinturas, alimenticias, etc., utilizan equipos de control para recuperar materia prima que se fuga a la atmósfera durante el transporte o almacenamiento siendo una fuente común de emisiones de partículas dentro de las mismas; por consiguiente, el reciclaje utilizado como método de control de emisiones es una muy buena alternativa que se aplica en la actualidad ya que genera ahorro energético y por tanto económico para los Empresarios y controla la contaminación atmosférica generando un bienestar social.

1.1 Breve Historia del Control de la Contaminación Industrial del Aire

La polución del aire no es un fenómeno reciente, pues en 1972 el Rey Eduardo I de Inglaterra trató de despejar los cielos llenos de humo sobre Londres, al prohibir el uso de "carbón marítimo".* El parlamento Británico ordenó torturar y ahorcar a un hombre que vendía u consumía dicho carbón. Durante el reinado de Ricardo II (1377-1399) y más tarde durante el reinado de Enrique V (1413-1422), se tomaron medidas en Inglaterra para reglamentar y restringir el uso del carbón (8).

Una de las primeras publicaciones de que se tiene conocimiento y que trata de la contaminación del aire es un panfleto publicado en 1661 por orden real de Carlos II: "Cómo disipar las inconveniencias del aire y del humo de Londres; junto con algunas soluciones propuestas con toda humildad (Fumifugium)" * . Uno de los primeros intentos legales para controlar la contaminación en los Estados Unidos es la publicación de una ordenanza en 1895 la cual consideraba ilegal que se viera salir vapor del escape de los vehículos de vapor (8). Esta breve reseña sobre las formas que se utilizó en el pasado para reglamentar y controlar la contaminación del aire reflejan la preocupación del hombre por su preservación.

CASOS GRAVES DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Aunque ya en 1272 se observó una limitada contaminación, es solo en años relativamente recientes que ha llegado a ser un problema serio. En 1873 se produjo una neblina en Londres reportándose 268 muertes producidas por bronquitis. En Diciembre de 1930, una sección altamente industrializada del valle Meuse en Bélgica experimentó una neblina severa de tres días durante la cual miles de personas se enfermaron y sesenta murieron. Para Enero de 1931 se produjo una neblina de nueve días en Manchester y Salford, Inglaterra, producto de la cual quinientas noventa y dos personas murieron lo que representaba un considerable incremento en la tasa de mortalidad (8).

En 1948, en Donora, Pennsylvania, un pequeño pueblo dominado por plantas químicas y de acero soportó una niebla de cuatro días lo que hizo enfermar a más de la mitad de la población de ciento cuarenta mil habitantes. En enero de 1956, se responsabilizó a otra neblina por la muerte de mil personas más en Londres. Dos años después, Londres soportó una gran neblina que duró desde el cinco al ocho de Diciembre, diez días después se conoció que el número total de muertes durante ese período excedió los cuatro mil, las

estadísticas mostraron que la mayoría murió de bronquitis, enfisemas, o problemas cardiacos (8).

Estos pocos testimonios que han transcurrido durante la historia indican la gravedad del problema y la necesidad imperiosa a nivel mundial de controlar y tratar de eliminar la Polución, un ejemplo de esto es la eliminación del mercado mundial del refrigerante R12 por su alta contenido de carbono nocivo para la capa de ozono quien filtra los rayos ultravioleta provenientes del Sol nocivos para la Salúd Humana.

1.2 Leyes y Reglamentos Acerca del Control de la Contaminación Industrial del Aire en la Ciudad de Guayaquil.

En nuestro país la Legislación Nacional se ha preocupado por generar leyes que permitan el desarrollo de la *producción limpia y más eficiente* entendiéndose por tal como una Producción sin contaminación, una de estas es el Reglamento que Establece las Normas de Calidad del Aire y sus Métodos de Medición* en el cual define el concepto de Contaminación del Aire y su forma de medición vigente en la actualidad necesario para poder desarrollar un Control de Emisiones de Partículas adecuado.

CONTAMINACIÓN DEL AIRE.- según el registro oficial Ecuatoriano # 726 artículo 3 da la siguiente definición:

---

* Apéndice B

"Entendiéndose por contaminación del aire la presencia o acción de los contaminantes, en condiciones tales de duración, concentración o intensidad, que afectan desfavorablemente la salud humana, animal o vegetal, los bienes materiales del hombre o de la comunidad o interfieran en su bienestar".

Existen otras definiciones de diferentes autores, pero todas convergen a un mismo objetivo el cual es la preservación de la atmósfera. Se ha tomado en cuenta el concepto anterior ya que es el vigente en nuestro país.

Para indicar el grado de contaminación que se tiene, la cantidad de contaminantes que se emiten a la atmósfera o la cantidad permitida por las entidades de control se necesita definir al factor de emisión, la tasa de emisión y la emisión estándar.

FACTOR DE EMISIÓN.- Es la emisión de un contaminante expresada de términos de masa de contaminante por masa de materia prima usada en el proceso; sus unidades son Kg/Ton de materia prima ó Kg./KWH consumido.

TASA DE EMISIÓN.- Es la emisión de una partícula contaminante expresada en términos de masa de contaminante por unidad de tiempo; sus unidades son Kg/s, Kg/h ó Kg/año.

EMISIÓN ESTÁNDAR.- Es una regulación estandarizada por alguna agencia gubernamental (ej.: EPA) u organismo apropiado para

controlar o limitar las emisiones instantáneas de una o varia fuentes tanto industriales como no industriales.

ESTÁNDAR DE CALIDAD DEL AIRE.- Es la concentración máxima de un contaminante en el aire ambiental durante un tiempo de muestreo, dicho estándar es fijado por una agencia gubernamental; se la define como la masa de contaminante por unidad de volumen de aire (usualmente de un metro cúbico), expresada a temperatura y presión estándar; sus unidades son $\mu g/m^3$ y ppm* (partes por millón) para poder pasar de una unidad a otra se utiliza la ecuación:

$$\mu g/m^3 = \frac{ppm * Mi}{24.5} * \left(10^3\right) \qquad \text{Ec. 1.1}$$

a condición estándar de 25 °C y 1 atm. de presión, donde Mi es el peso molecular del contaminante; ó usando:

$$\mu g/m^3 = \frac{ppm * Mi * P}{8.314 * T} \qquad \text{Ec. 1.2}$$

para cualquier Presión en [Pa] y Temperatura en [^{0}K].

1.3 Equipos y Métodos de Medición de la Contaminación por Material Particulado.

La necesidad de determinar la cantidad y tipo de partículas en suspensión en el aire ha originado métodos e instrumentos

---

* Parte por millón = Medida de concentración de contaminante que corresponde a 1 mg. por cada litro de aire.

adecuados para este fin. Un grupo de partículas pueden ser caracterizadas por su concentración, distribución de tamaño y su composición química; el interés se concentra básicamente en relacionar la concentración y el tamaño de las partículas en un rango determinado, por ejemplo desde 0.01 a 10 μm de diámetro y desde 1 hasta 10^6 partículas/cm^3 (10).

Los métodos de medición usados comúnmente para determinar la concentración y distribución del tamaño de partículas son dados por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos y por el Banco Mundial. En nuestro país se encuentra en vigencia el método gravimétrico utilizando un muestreador de alto volumen para partículas totales en suspensión y el método gravimétrico para partículas sedimentables (Apéndice C).

Existen diferentes instrumentos para evaluar la contaminación por partículas, pero se considera al "impactador de cascada" como el equipo adecuado por su uso en fraccionar las muestras de partículas y poder obtener la descripción de ellas como función de su tamaño, condición necesaria para lograr el diámetro de partícula representativo de la concentración de polvo en el aire que se desea controlar a través del diseño de un equipo de control adecuado.

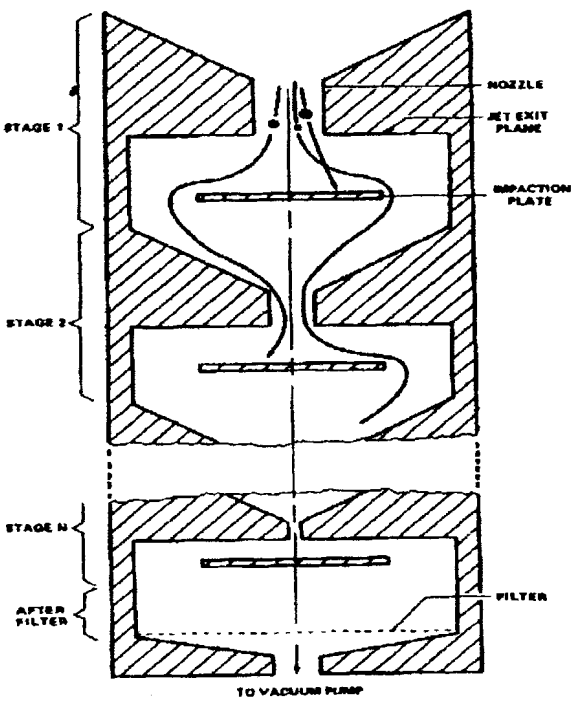
IMPACTADOR DE CASCADA:

Es un equipo de muestreo manual cuya colección de partículas es hecha con un filtro simple de un material adecuado, que entrega la muestra fraccionada para realizar un estudio químico o para encontrar la concentración como función del tamaño de partículas. Un impactador de una etapa consiste de una garganta dirigiendo una corriente de aire a alta velocidad contra una superficie sólida, la cual causará que las partículas cuyo diámetro sea mayor que el diámetro de corte de la etapa, impacten y se depositen, mientras las pequeñas siguen viajando en la corriente de aire alrededor de la barrera.

El diámetro de corte de cada etapa puede ser modificado si variamos el diámetro de la garganta o la velocidad del chorro de aire, teniendo en cada etapa un diámetro y concentración determinada; el diámetro mínimo que se puede colectar es de 0.3 μm.

La figura 1.1 muestra su principio de funcionamiento; este equipo típicamente consta de seis u ocho etapas de impacto, en cada una de las cuales la superficie destinada a este fin regularmente está cubierta por una capa adhesiva que evita el rebote de las partículas; el diámetro de corte es limitado por el tamaño de la garganta y por la caída de presión permisible a través del impactador.

Una práctica común que se realiza en el impactador convencional para reducir el diámetro de corte hasta 0.05 μm es hacer operar al equipo a bajas presiones o empleando chorros de gas a velocidades altas; no obstante, esta práctica conlleva ciertas dificultades con partículas volátiles que pueden evaporarse a bajas presiones o partículas pesadas a altas velocidades (10).

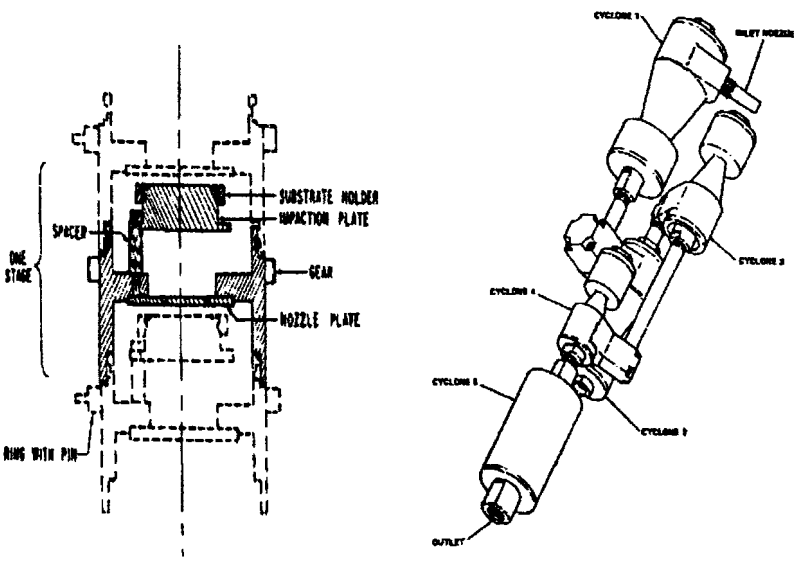


Fuente [10]

Fig. 1.1 Impactador de Cascada

Para partículas con diámetro de corte por debajo de los 0.05 μm se tiene el "*impactador uniforme de micro-orificio*" que funciona a bajas velocidades de corriente de aire o a muy bajas presiones en las etapas. Cuando se trata de alta concentraciones en masa de

contaminantes particulados en el aire se utiliza el "*muestreador ciclónico*", que separa las partículas mediante fuerza centrífuga; es posible encontrar ciclones en cascada para obtener la concentración como función del diámetro, pero su diseño es realizado con la teoría de prueba y error, además en estos muestreador no hay rebote de partículas como ocurre en otros impactadores. La figura 1.2 muestra un ciclón en cascada y un impactador uniforme de micro-orifico



Fuente [10]

Fig. 1.2 a) Impactador de Micro-Orificio, b)Ciclón en Cascada

1.4 Definición del Problema

Este trabajo se limita al control de contaminación del aire debido a fuentes estacionarias, particularmente por la industria del cemento. Durante el proceso de transporte (por métodos mecánicos ó a través de aire), almacenamiento (silos), descarga de gases de combustión

(por chimenea) y distribución del cemento (máquinas envasadoras), se producen escapes de material mineral particulado hacia la atmósfera, estableciendo estos puntos como fuentes de emisión puntuales que determinan la baja calidad del aire ocasionando trastornos graves en el sistema respiratorio de las personas y además esta alta concentración determina pérdidas de materiales o materia prima que se desea recupera para su reciclaje al proceso, obteniendo una mayor optimización de los minerales necesarios para su fabricación. El lugar donde se considera la utilización de un equipo de control adecuado de acuerdo a la necesidad de controlar las emisiones y recuperar material es a la salida del horno, en el proceso de enfriamiento durante el transporte (Apéndice D).

Formulación del Problema:

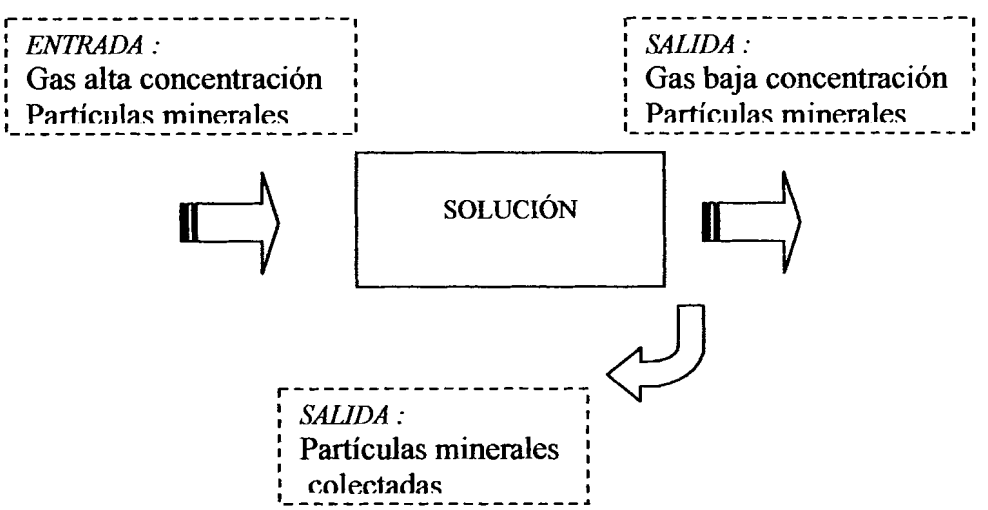


Fig. 1.3 Diagrama Esquemático de Formulación del Problema.

Definiendo los estados del problema:

Estado A: flujo de gas con alta concentración de partículas minerales.

Estado B: partículas recolectadas y gas con baja concentración de partículas minerales

Definiendo el siguiente problema:

"A partir de un flujo de gas con alta concentración de partículas minerales, obtener un gas con baja concentración de partículas y las mismas colectarlas para su reutilización al proceso".

Análisis del Problema:

Luego de tener definido el problema, se lo analiza para obtener las variables de entrada y salida que intervienen en el mismo.

Estado A: flujo de gas con alta concentración de partículas minerales.

Variables de entrada	*limitación*
- caudal de gas	requerido
- concentración	alta
- tamaño partículas	6 <dp <14 (μm)
- tipo de Partícula	cemento
- temperatura	sobre T. de rocío

Estado B: partículas colectadas y gas con baja concentración de partículas minerales.

Variables de salida	*limitación*
- concentración	baja
- eficiencia de colección	99.9 %
- eficiencia de recuperación	alta
- caída de presión	baja

Para determinar el tipo de solución, se tienen que analizar las variables de solución con sus respectivas restricciones impuestas, y los criterios que se deben tener presentes para su selección.

Variables de solución

- método para separar partículas
- método para colectar partículas
- tipo de funcionamiento
- eficiencia de colección

Restricciones

- tipo de partículas: cemento (dp entre 10 μm)
- colección continua y seca
- funcionamiento flexible y continuo
- del 99.9%

Criterios de selección

- fácil mantenimiento
- modular
- desmontable

- costo

1.5 Métodos Para el Control de la Contaminación Industrial del Aire

En el desarrollo de la solución apropiada se tiene como una variable el método o mecanismo de separación de las partículas presentes en el gas. Existen para este fin seis mecanismos disponibles, que se pueden clasificar como *de sedimentación por gravedad, impactación centrífuga, impactación por inercia, intersepción directa, difusión y efectos electrostático* los mismos que determinan el tipo de equipo de control adecuado para la aplicación requerida. A continuación se presentan las cinco clases básicas de equipos de colección de partículas con sus características principales de operación:

Cámaras de Sedimentación

Características:

- ✓ Su mecanismo de colección es la fuerza de gravedad
- ✓ Se usa para partículas mayores a 50 μm con una alta eficiencia
- ✓ Para altas velocidades de asentamiento de partículas

Separadores Ciclónicos.

Características:

- ✓ Su mecanismo de colección es la impactación centrífuga (fuerza centrífuga)

- ✓ Se usan para partículas mayores a 25 μm con eficiencias entre 95 a99 %; para partículas menores, baja la eficiencia (ej.: para dp entre 5 y 20 μm, su eficiencia esta entre 50 y 80 %)
- ✓ La eficiencia de remoción cae rápidamente más allá de un cierto tamaño de la partícula.
- ✓ Mantenimiento sencillo

Colectores Húmedos

Características:

- ✓ Se utiliza un líquido (por lo general agua) para aumentar el tamaño de partícula y facilitar la separación.
- ✓ El mecanismo de separación puede ser cualquiera de los mencionados anteriormente
- ✓ Existe una elevada humedad

Filtros de Tela

Características:

- ✓ Su mecanismo de colección es a través de impactación por inercia, intersepción directa y difusión, por lo que puede separar una amplia gama de polvos.
- ✓ Puede trabajar con una amplia gama de diámetro de partículas ,entre 0.05 y 20 μm; se tiene alta eficiencia (99% o más), la cual

aumenta a medida que transcurre el tiempo de filtración.

- ✓ Caída de presión razonablemente baja y condiciones de operación flexibles.
- ✓ No puede trabajar con gases húmedos y corre riesgo de incendio y explosión.

Precipitadores Electrostáticos

Caracteristicas:

- ✓ Su mecanismo de colección es por fuerzas electrostáticas inducidas por una carga una carga eléctrica y un electrodo colector de polaridad opuesta.
- ✓ Se usa para remover partículas con dp entre 0.05 y 20 μm con una alta eficiencia.
- ✓ Puede trabaja en un amplio rango de temperaturas, pero no es de operación flexible.
- ✓ Tiene un alto costo inicial e ineficiente con partículas de alta resistencia.

En el apéndice D se proporciona una ayuda para seleccionar el equipo adecuado de acuerdo al tipo y tamaño de partícula ya que se observa el rango de operación de cada equipo de control de acuerdo al tamaño de partícula y los diferentes tipos de partículas. En este caso se va ha colectar polvos de cemento para dp alrededor de 10

μm, determinando al filtro de alta eficiencia y al precipitador electrostático como los más adecuados.

Considerando las restricciones de las variables de solución, *el filtro de alta eficiencia es el equipo mas adecuado*, lo que refleja la siguiente tabla de valoración.

Tabla I

Tabla de Valoración para Selección del Equipo Adecuado

Equipo	dp<10μm	Eficiencia 99.9%	Colección continua y Seca	Flexibilidad De operación	**total**
Cámara Sedimentación	30 5	40 5	15 12	15 12	100 34
Separador Ciclónico	30 10	40 6	15 12	15 12	100 40
Colector Húmedo	30 30	40 20	15 4	15 14	100 68
Filtro de Alta eficiencia	**30 30**	**40 35**	**15 13**	**15 15**	**100 93**
Precipitador Electrostático	30 30	40 30	15 15	15 10	100 85

1.6 Utilización del Modelo Como Medio de Recuperación de Materia Prima o Producto Terminado.

Como de ha dicho anteriormente las maneras básicas de reducir la concentración de partículas dispersas en un gas (aire), es a través

del control y la prevención. Para un mejor manejo de aplicación del diseño se combinan estos dos principios.

Según EPA la jerarquía de la prevención de contaminación consiste en:

a) *Reducción en la fuente.*- Se producen modificaciones al proceso para eliminar o reducir la cantidad de residuo generado

b) *Reciclaje.*- Trata de la recuperación de material útil desde un flujo de residuo, por lo que los equipos de control se los usa como parte del proceso.

c) *Tratamiento.*- A los residuos que aún quedan después de las reducciones anteriores se los somete a métodos de tratamiento químico, físico o biológico o a una combinación.

d) *Disposición de residuos.*- Se unan rellenos técnicamente diseñados en los cuales se depositan los residuos.

De lo expuesto, a través del reciclaje se puede recuperar material durante el proceso o al final del mismo, aumentando la eficiencia en el proceso optimizando el uso de la materia prima por consiguiente la ventaja se refleja en la reducción de los costos de producción.

CAPITULO 2

2. TEORIA DE PARTICULAS Y MEDIO FILTRANTE

Los problemas que generan las partículas presentes en el aire están en función del rango de tamaño, de la concentración y de la composición física y química de las mismas; las partículas con dp entre 1 y 20 μm tienden a seguir el movimiento del gas por cuanto viajan en él. Las partículas mayores a 20 μm tienen altas velocidades de asentamiento por tanto el aire las arrastra durante periodos relativamente cortos dándose una diferencia significativa en el comportamiento de las mismas y por tanto, en el tipo de equipo de control para captar dichas partícula.

Como las partículas son llevadas por un fluido gaseoso es necesario estableces su comportamiento (su dinámica en el gas), para ello se analizan las fuerzas que actúan sobre ella, el régimen de flujo del fluido (caracterizado por el número de Reynolds) y velocidad de asentamiento para poder obtener el mecanismo de captación adecuado.

2.1 Comportamiento de las Partículas en Fluidos

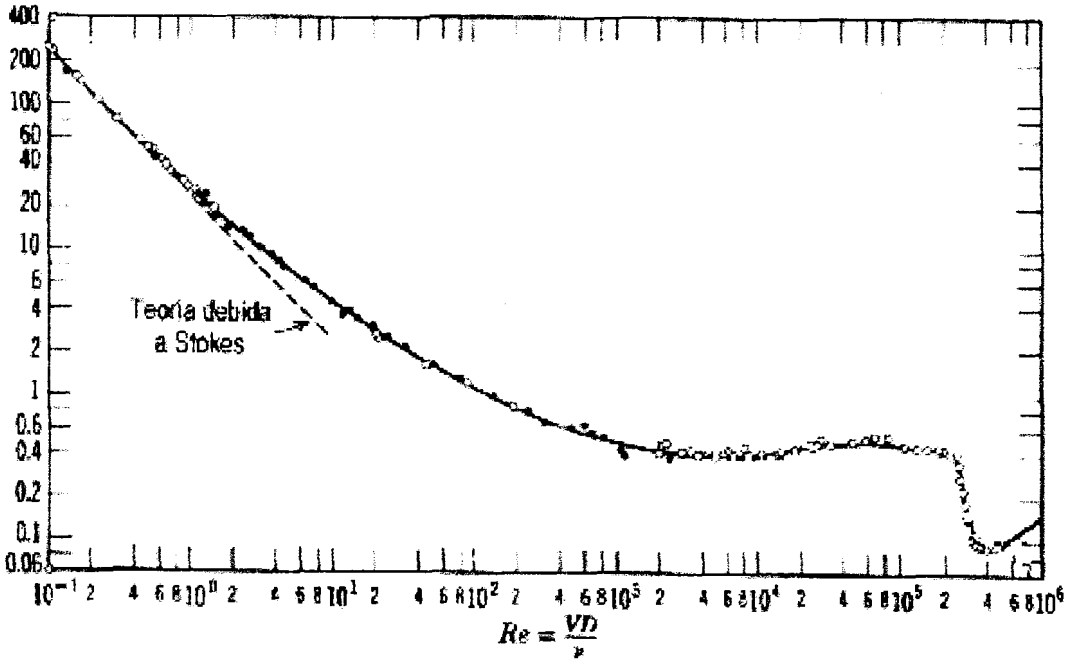
El comportamiento de las partículas en un fluido gaseoso es tal como el de una esfera sumergida, la cual experimenta fuerzas de corte (de fricción) y de presión que producen la fuerza neta debido a la acción del fluido; esta fuerza se descompone en sus componentes paralela al movimiento llamada fuerza de arrastre y en otra perpendicular llamada fuerza de sustentación o buoyantes (7), además se considera la fuerza debido a la acción de la gravedad llamada fuerza gravitacional.

La separación del fluido sobre la esfera por la presencia de un gradiente de presión adverso prohibe la determinación analítica de la fuerza actuante sobre la partícula por lo que hay que apelar a coeficientes medidos experimentalmente para obtener la sustentación y el arrastre.

Para Reynolds (Re) menores a la unidad no hay separación de flujo dando una estela laminar y el arrastre es predominantemente de fricción llamándose a esta zona *régimen de Stokes*.

Al aumentar el número de Reynolds, el arrastre disminuye de forma continua generándose una combinación de arrastre por fricción y por presión como resultado de la separación de flujo y además, el arrastre por fricción va disminuyendo con forme aumenta Reynolds

como se observa en la Figura 2.1 quien describe el comportamiento de un esfera en el aire.



Fuente [7]

Fig. 2.1 Coeficiente de Arrastre Para una Esfera Lisa en Función del Número de Reynolds.

Sin embargo el tamaño de las partículas que se estudian son de diámetro menor a 20 μm siendo un factor determinante al evaluar el número de Reynolds, con estos tamaños muy pequeños se obtienen valores de Reynolds menores a la unidad indicando que el comportamiento de dichas partículas en el fluido gaseoso *se rige en la zona de flujo laminar o Régimen de Stokes* por cuanto siempre se tiene un arrastre predominante de fricción para dichas partículas;

cabe indicar que para partículas hasta alrededor de 100 μm se tienen números de Reynolds muy pequeños describiendo también su comportamiento laminar.

2.1.1 Fuerza de Arrastre.

Como de ha dicho anteriormente la componente horizontal de la fuerza neta que ejerce el fluido sobre la partícula en la dirección del movimiento del fluido se llama fuerza de arrastre la cual se resiste al movimiento de la misma, definida como:

$$F_D = \frac{\pi * d_p^2 * \rho_g * v_p^2 * C_D}{8} \qquad \text{Ec. 2.1}$$

donde: ρ_g = densidad del gas (aire)

V_p = velocidad de partículas

C_d = coeficiente de arrastre

d_p = diámetro de partícula

Considerando que la separación del fluido en la partícula por la presencia de un gradiente adverso de presión determina que no se puede obtener de forma analítica dicha fuerza, se debe recurrir al coeficiente experimental que se lo denomina *coeficiente de arrastre (Cd),* el mismo que es función del número de Reynolds; es decir **Cd = f(Re)**.

Para números de Reynolds < 1, donde la estela que se forma en la partícula es laminar (flujo laminar), la fuerza de arrastre que actúa sobre ella está determinada por la ley de Stokes que gobierna el comportamiento de las partículas en el fluido gaseoso y está dada por:

$$F_D = 3 * \pi * \mu * d_p * v_r \qquad \text{Ec. 2.2}$$

donde: μ = viscosidad absoluta del fluido (aire)

Comparando las ecuaciones 2.1 y 2.2 se tiene que el coeficiente de arrastre para el régimen laminar o de Stokes es:

$$C_d = \frac{24}{R_e} \qquad \text{Ec. 2.3}$$

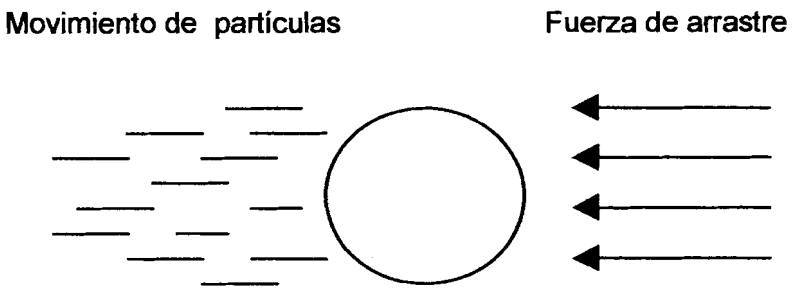


Fig. 2.2 fuerza de arrastre

La Figura 2.2 describe la acción de la fuerza de arrastre sobre la partícula en movimiento.

FACTOR DE CORRECCIÓN DE CUNNINGHAM

Si el tamaño de las partículas son mayores a 3 μm en diámetro, el fluido es continuo alrededor de la partícula, es decir no es afectada por la colisión con las moléculas de aire; sin embargo si las partículas son iguales o más pequeñas que 3 μ m, el fluido es discontinuo y son afectadas por la colisión de las moléculas de aire. Estas colisiones causarán el movimiento de las partículas en una dirección relacionada con la acción de fuerzas combinadas (movimiento Browniano), por lo que ahora tienden a deslizarse junto a las moléculas del gas.

Cunningham dedujo que el coeficiente de arrastre debería reducirse debido al fenómeno descrito anteriormente en partículas muy pequeña, así tal coeficiente de arrastre es corregido por el factor de Cunningham como se observa en la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{24}{R_e * C_f} \qquad \text{Ec.2.4}$$

donde: C_f = factor de corrección de Cunningham

y se lo calcula como:

$$c_f = 1 + \frac{6.21 * 10^{-4} * T}{d_p} \qquad \text{Ec. 2.5}$$

Donde: T = temperatura de fluido [° K]

dp = diámetro de partículas

ó se lo puede obtener a través de tablas como se ve en la tabla II.

Tabla II

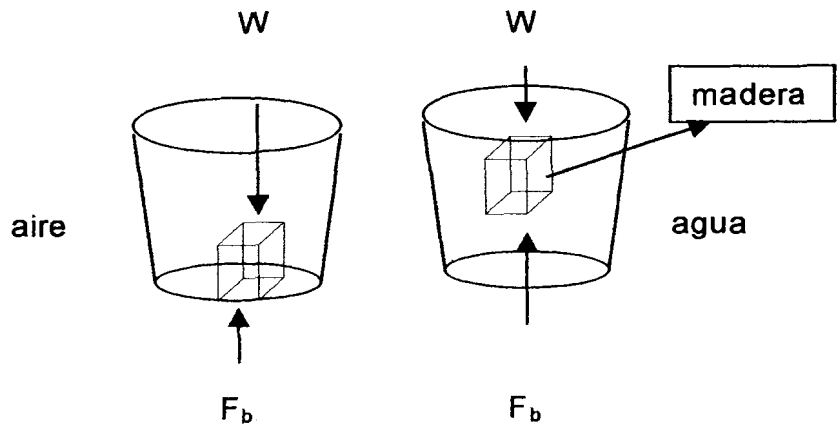
Valores de C_f Para Aire a Presión Atmosférica

Diámetro de particulas (μm)	C_f a diferentes temperaturas		
	70 °F	212 °F	500 °F
0.1	2.88	3.16	5.14
0.25	1.682	1.952	2.528
0.5	1.325	1.446	1.711
1.0	1.160	1.217	1.338
2.5	1.064	1.087	1.133
5.0	1.032	1.043	1.067
10.0	1.016	1.022	1.033

2.1.2 Fuerza de Buoyantes

La componente perpendicular al movimiento del aire de la fuerza resultante producida por el flujo sobre las partículas se la conoce como *fuerza de buoyantes o sustentación* la misma que produce la suspensión de las partículas en el aire; se la define como el peso del fluido desplazado, este concepto se lo puede visualizar a través del siguiente ejemplo (4):

Considérense dos recipientes idénticos, uno conteniendo agua y el otro con aire un pedazo de madera con iguales características se coloca en cada recipiente. Como se aprecia en el recipiente con aire, la fuerza que éste genera sobre el pedazo de madera no es tan fuerte para levantarlo como sucede en el recipiente con agua ya que la densidad del aire es mucho menor que la del agua, pero para partículas muy pequeñas el fluido gaseoso produce la fuerza suficiente para mantenerlas en suspensión en un largo o corto periodo de tiempo en función de la velocidad de asentamiento y del tamaño de las partículas.



Fuente [4]

Fig. 2.3 Efecto de la Sustentación en Diferentes Fluidos.

La fuerza de buoyantes se la puede escribir como:

$$F_b = \rho_g * v_g * g \qquad \text{Ec. 2.5}$$

Como las partículas se encuentran sumergidas dentro de todo el gas, entonces la ecuación anterior queda descrita de la siguiente forma:

$$F_b = \frac{\rho_g * \pi * d_p^3 * g}{6} \qquad \text{Ec.2.6}$$

donde: g = aceleración de gravedad

2.1.3 Fuerza Gravitacional

Esta fuerza es la que experimenta todo cuerpo que se encuentra dentro de la atmósfera terrestre, que es generalmente el peso del cuerpo, particularmente para las partículas esta fuerza puede ser expresada como:

$$F_g = m_p * g$$

como la masa de la partícula es igual a su densidad multiplicada por su volumen y considerándola como una partícula esférica (volumen de una esfera), se la puede escribir como:

$$F_g = \frac{\rho_p * \pi * d_p^3 * g}{6} \qquad \text{Ec. 2.7}$$

Comparando las ecuaciones de fuerza de gravedad y de buoyantes se puede ver que son muy similares, con diferencia en sus densidades respectivas. Se tiene que la densidad de las partículas suspendidas es mucho mayor que la densidad del aire por consiguiente la fuerza de buoyantes generalmente es despreciada en el balance de fuerzas.

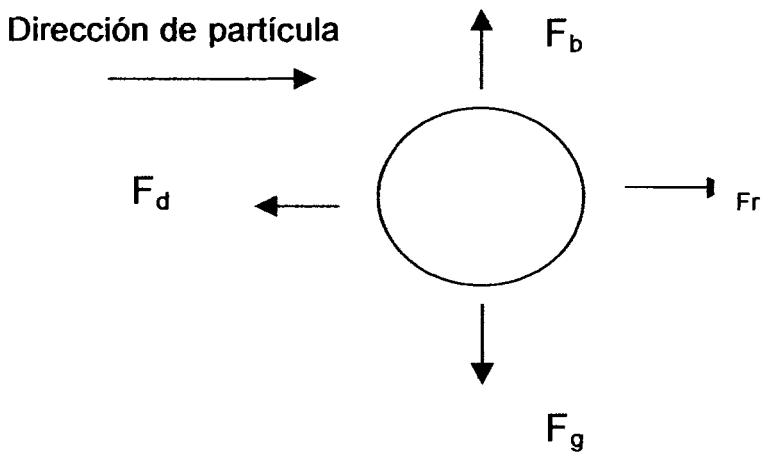
2.1.4 Fuerzas Externas

Además de las fuerzas analizadas anteriormente actúan otras fuerzas adicionales sobre las partículas como son las fuerzas magnéticas, electrostáticas, inerciales y térmicas que afectan el proceso de colección de acuerdo al equipo de control utilizado; el equipo de filtración de alta eficiencia que se utilizará será afectado por tales fuerzas, controlándolas a través del periodo de filtración y manteniendo la temperatura de operación por arriba del punto de rocío para el caso de las térmicas (5).

2.2 Balance de Fuerzas en una Partícula.

Una partícula en movimiento en el fluido (aire) es afectada por las fuerzas discutidas con anterioridad, por lo que se puede aplicar la segunda ley de Newton, que establece que la aceleración de la masa de una partícula producida por una fuerza externa es

proporcional a la fuerza y en la dirección de la misma; la Figura 2.4 indica el balance de las fuerzas aplicadas sobre una partícula en movimiento.



Fuente [4]

Fig. 2.4 Balance de Fuerzas

La segunda ley de Newton establece:

$$\Sigma F = m * dv/dt$$

el vector suma de fuerzas es igual a la fuerza resultante F_r que puede ser escrito como:

$$F_r = F_g - F_b - F_d = m * dv/dt$$

Previamente se indicó que en el control de la contaminación del aire la densidad de la partícula es mucho mas grande que la densidad del aire y por tanto la fuerza de buoyantes puede ser ignorada.

La fuerza de arrastre sobre la partícula aumenta a medida que se incrementa la velocidad hasta que dicha fuerza sea tan grande como las otras fuerzas en este punto la fuerza resultante será cero y la partícula no se seguirá acelerando; si la partícula no se acelera, entonces se mueve a una velocidad constante donde todas las fuerzas están balanceadas (4). Este balance de fuerzas se da en la velocidad terminal de asentamiento o de sedimentación, es decir durante la velocidad constante descendente que alcanza la partícula; de acuerdo con lo anterior se tiene:

$$F_r = F_g - F_b - F_d = 0 \qquad (F_b = \text{se desprecia})$$

$$F_g = F_d$$

Substituyendo sus valores respectivos:

$$\frac{\rho_p * \pi * d_p^3 * g}{6} = 3 * \pi * \mu * d_p * v_p$$

Resolviendo para la velocidad de la partícula se obtiene su velocidad de asentamiento en el régimen laminar, la cual se la escribe como:

$$v_t = \frac{g * \rho_p * d_p^2}{18 * \mu} \qquad \text{Ec. 2.8}$$

2.3 Tratamiento Matemático de Datos.

En el diseño de filtros de mangas es importante conocer el tamaño de partícula que se va a colectar ya que un apropiado diseño depende directamente de un buen dato de tamaño de partícula; dicho tamaño se lo define por su diámetro, siempre y cuando sea esférico, sin embargo las partículas sólidas no son esféricas sea cual fuere su origen en los procesos industriales o naturales lo que determina que la medición del diámetro no sea tan obvia; para ello es necesario definir un diámetro equivalente.

Se pueden definir diámetros basados en características físicas y geométricas de la partícula como el área proyectada, área superficial, volumen, masa, etc.; también se pude definir un diámetro en términos del comportamiento de las partículas en el gas como lo es el diámetro aerodinámico el cual se define como sigue (8):

Diámetro aerodinámico se define como el diámetro de una esfera con la densidad de 1g/cm^2 que cae libremente en un flujo laminar a la misma velocidad terminal de la partícula no esférica.

Este diámetro es el utilizado en el diseño del filtro de mangas ya que se rige dentro de la ley de Stokes y es función del tamaño físico, forma y densidad de partícula, además este diámetro es medido a

través del *impactador de cascada* que se lo describió en el capítulo uno.

La masa de partículas colectadas en cada etapa del impactador es usada para determinar la distribución del tamaño de las partículas en el gas; es provechoso caracterizar a toda la distribución por medio de un solo diámetro siendo este el valor distintivo de la distribución. Los diámetros característicos más utilizados en los estudios de contaminación son (8):

- Diámetro mediano del número (conteo); es aquel diámetro para el cual el 50% de las partículas son mayores o menores, por conteo, es decir, el área bajo la curva de la distribución es la misma a ambos lados de la línea vertical que representa el valor mediano.

- Diámetro mediano de masa; es aquel para el cual la masa de todas las partículas mayores de éste constituye el 50% de la masa total.

- Diámetro medio o aritmético; se encuentra generalmente por la suma de todos los valores de la variable aleatoria (diámetro aerodinámico) dividida por la suma del número total de muestras.

Otro factor importante de la distribución de las partículas es su amplitud, o sea, cuanta área bajo la curva de la distribución está en los alrededores del valor medio. Una medida de amplitud o dispersión es la varianza (σ^2), donde su raíz cuadrada positiva es la desviación estándar (σ) (8).

En cierto número de fenómenos naturales e industriales, la distribución de una variable aleatoria se acerca a una "distribución normal o gaussiana". Se sabe por experiencia que muchas colecciones de partículas muestran una distribución normal cuando la fracción de masa de partículas se traza contra el logaritmo de dp más bien que contra dp, se dice entonces que dicha colección es una *"distribución logarítmica - normal"* (8); cuando una distribución es gaussiana, los diámetros medios y medios aritméticos son iguales (8).

Un distribución log - normal es caracterizada por dos parámetros: el medio geométrico (diámetro medio) y la desviación estándar geométrica que están relacionados entre sí a través de:

$$\text{Log}(d_{84.1}) = \log(d_{50}) + \log \sigma_g \text{ y} \qquad \text{Ec. 2.9}$$

$$\text{Log}(d_{15.9}) = \log(d_{50}) - \log \sigma_g \qquad \text{Ec. 2.10}$$

Donde: $d_{84.1}$ = diámetro de partículas que constituyen el 84.1% de la masa total que son menores a esta tamaño

d_{50} = diámetro medio geométrico

$d_{15.9}$ = diámetro de partículas que constituyen el 15.9% de la masa total que son menores a esta tamaño

σ_g = desviación estándar geométrica

las ecuaciones 2.9 y 2.10 pueden escribirse juntas como:

$$\sigma_g = \frac{d_{84.1}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{15.9}} \qquad \text{Ec. 2.11}$$

Cuando solo se dispone de una cantidad limitada de datos experimentales para una muestra de partículas y la distribución no es normal, es difícil relacionar de manera sencilla los diámetros de las partículas con el conteo de las mismas; sin embargo, la experiencia muestra que muchas muestras de polvo son *log-normales*. Ajustando una línea recta a los datos sobre una gráfica logarítmica de probabilidad, se puede determinar σ_g y d_{50}, donde en el eje Y se coloca el diámetro de partícula y en el eje X el porcentaje de masa acumulado de la muestra (8).

2.3.1 Obtención del Diámetro de Partícula Característico:

Los datos de tamaños de partículas y de porcentaje de fracción de masa acumulada que se han obtenido en el lugar donde se va ha aplicar el filtro de mangas (tabla III), se

grafican en una hoja logarítmica de probabilidad manteniendo los ejes descritos anteriormente.

Tabla III

Datos de Tamaño y Fracción de Masa de partículas

ϕ Partícula (μm)	% de masa	% de masa acumulada
2.5	18	18
5.0	20	38
10	4	42
15	2	44
20	30	74
>20	26	100

Fuente [6]

Los datos se los ajusta con una línea recta lo mejor que se pueda; luego se procede a leer el diámetro que corresponde al 50% de la fracción de masa acumulada el cual es d_{50}, y se hace lo mismo para $d_{84.1}$ con el 84.1% de la fracción de masa acumulada para obtener la desviación estándar. En el Apéndice F se aprecia la gráfica del procedimiento descrito.

Los resultados son los siguientes de acuerdo a la gráfica:

✓ d_{50} = 11 (diámetro característico para diseño del filtro)

✓ $d_{84.1}$ = 22

obteniendo una desviación estándar σ_g = 2

2.4 Mecanismo de Colección de Partículas

En el primer capítulo se mencionaron los seis mecanismos utilizados para la colección de las partículas en los equipos de control. Debido que el equipo de control seleccionado es un filtro de mangas (filtro de alta eficiencia), se considerará solo los mecanismos que intervienen en el proceso de filtrado los mismos que son: impactación por inercia, intersepción directa y difusión,

Impactación Por Inercia.- Esta asociada con las partículas relativamente grandes (dp > 20 μm) que viajan en una ruta de colisión con el interceptor (mangas) pues su inercia las mantiene en su recorrido a pesar de que el gas y las partículas más pequeñas tienden a desviarse y pasar alrededor del interceptor, (Fig. 2.5, a).

Intercepción Directa.- Para partículas entre 3 y 20 μm aún cuando tienden a seguir la líneas de flujo alrededor del elemento interceptor pueden hacer contacto con él en el punto de mayor acercamiento; esto se da porque las líneas de flujo laminar del gas tienden a converger aguas abajo del intercepto y el radio de las partículas es mayor que la distancia entre las líneas del flujo y el interceptor (Fig. 2.5, b).

Colección Por Difusión.- En partículas muy pequeñas (dp < 3 μm), la colección se da por el movimiento browniano que tienen ya que

adquieren el movimiento de las moléculas del gas también llamado de difusión, (Fig. 2.5, c).

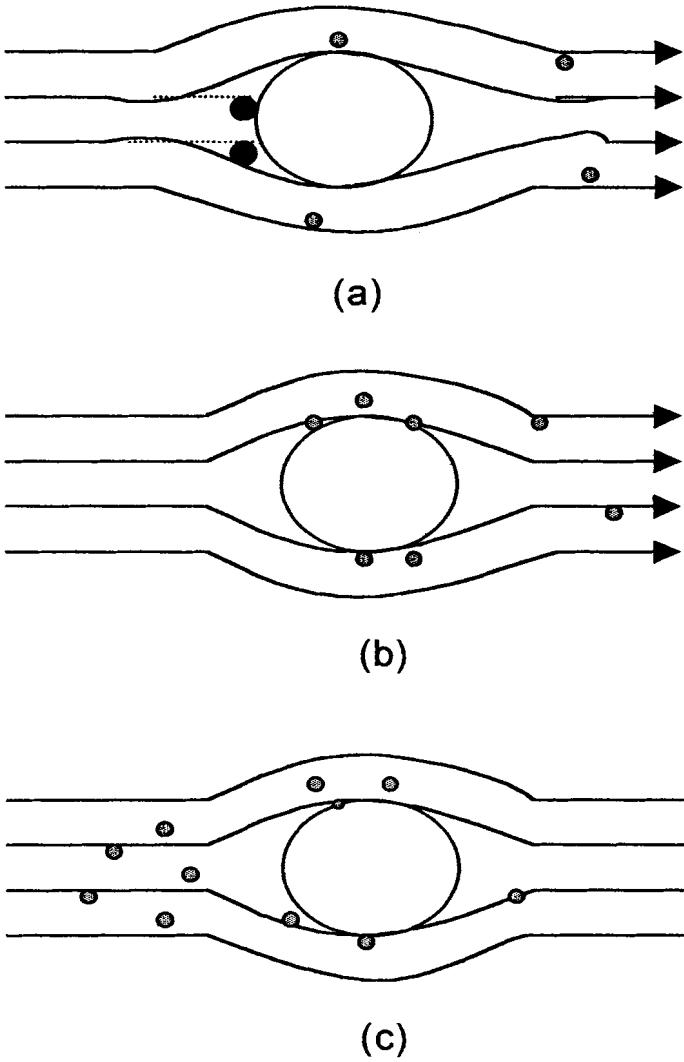


Fig. 2. 5 Mecanismos que Actúan en la Filtración: a) Impactación por Inercia; b) Intersepción Directa; c) Difusión.

Una característica importante del interceptor (mangas) es la de tener alguna sustancia que mejore la adherencia para cuando al impactar

las partículas no reboten, y con ello tratar de evitar desprendimientos de partículas ya colectadas que puedan regresar a la corriente de gas.

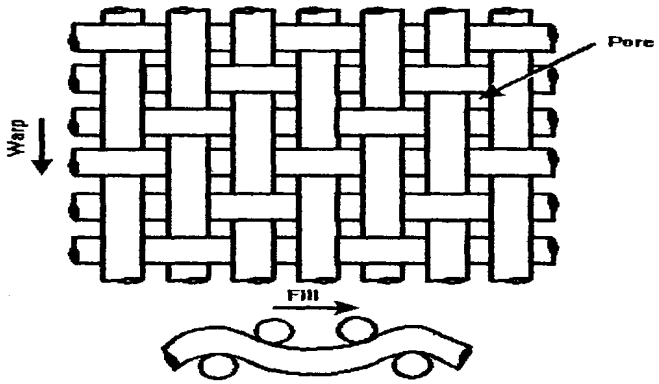
2.5 Características y Tipos de Medios Filtrantes

El proceso de filtración lo realiza básicamente un medio filtrante el cual es la "Tela de Filtración" por quien a los filtros de alta eficiencia también se los llaman *filtros de tela o de mangas.* Los materiales de fieltro y de tejido son usados para confeccionar los filtros de mangas, dependiendo su aplicación del método de limpieza que se utilice para remover el polvo atrapado en las mangas.

Filtros de Tejido.- Son construidos de hilos con un patrón definido repetido por consiguiente tienen espacios abiertos alrededor de las fibras, el hilo se teje por encima y por debajo de las fibras respectivas para formar un patrón de tablilla de retención. Existen dos tipos de confección de tejidos a saber, el de tela cruzada y de raso (satín).

En la trenza de tela cruzada el hilo se teje dos por encima y uno por debajo pero solo en una dirección, esta trenza es mas durable que la trenza sencilla. La trenza de raso se forma tejiendo el hilo uno por encima y cuatro por debajo en ambas direcciones, este trenzado es

muy estrecho y admite el uso de hilo muy fino por tanto el espacio entre fibras es mucho menor que en la tela cruzada (Fig. 2.6) (4).



Fuente [4]

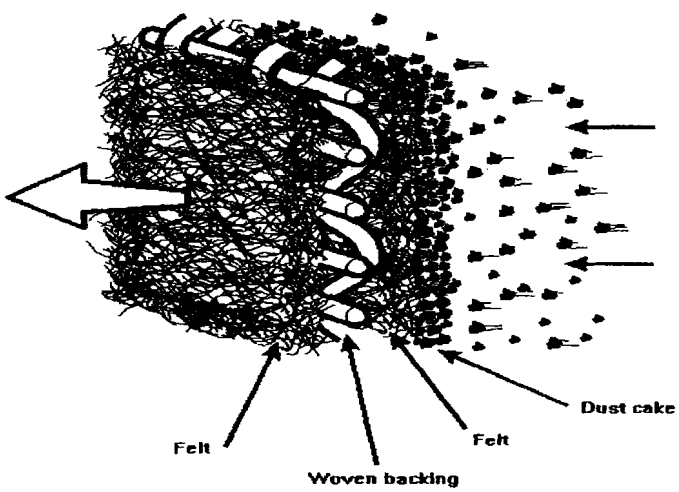
Fig. 2.4 Tejido de Tela Cruzada

Patrones diferentes de trenzado incrementan el espacio abierto entre las fibras lo que afectará la resistencia y permeabilidad de ambos tipos de telas; la permeabilidad de la tela afecta la cantidad de aire que pasa a través del filtro en una caída de presión especificada, una trenza estrecha (satín) tiene una baja permeabilidad y es mejor para capturar partículas pequeñas pero incrementa la caída de presión. Los filtros de tejido son usados con métodos de limpieza de baja energía tal como el de sacudimiento mecánico y de aire reverso.

Filtros de Fieltro.- Son formados de fibras posicionadas aleatoriamente y comprimidas en una alfombrilla que son agregadas suavemente a un material de tejido de sostén llamado "Scrim", el

fieltro es colocado en el Scrim por métodos químicos, de calor, resina y métodos de costura (4).

Para colectar partículas finas, los filtros de fieltro dependen en menor grado del depósito de polvo inicial en la superficie como sucede con los filtros de tejido; cada fibra aleatoria orientada de forma individual actúa como un blanco de impacto (impactador) para capturar las partículas por impactación o intersepción que son colectadas en la superficie externa del filtro (Fig. 2.7). los filtro de fieltro se usan generalmente con sistemas de limpieza de alta energía como lo es el sistema " pulse- jet " (pulso de aire) y en aplicaciones de baja humedad* (4).



Fuente [4]

Fig. 2.7 Filtro de Fieltro

Fibras.- Las fibras usadas para los filtros de tela varían dependiendo de la aplicación industrial que será controlada, varios filtros son hechos de fibras naturales tales como el algodón o lana; estas fibras son relativamente baratas pero tienen limitaciones de temperatura* ($T < 100^{\circ}$ C) y regular resistencia a la abrasión.

Fibra sintéticas como nylon, orlon y polyester tienen escasamente limitaciones de alta temperatura y de resistencia química. El nomex es registrado y fabricado por DUPONT el cual tiene una resistencia relativa a altas temperaturas y a la abrasión. Otra fibras como el teflón y el fiberglas pueden ser usadas para situaciones de alta temperatura** (230 a 260 $^{\circ}$ C), tienen buena resistencia al ataque ácido, pero son generalmente más caros que otra fibras; el apéndice G muestra los tipos de fibras con sus propiedades de acuerdo a su aplicación.

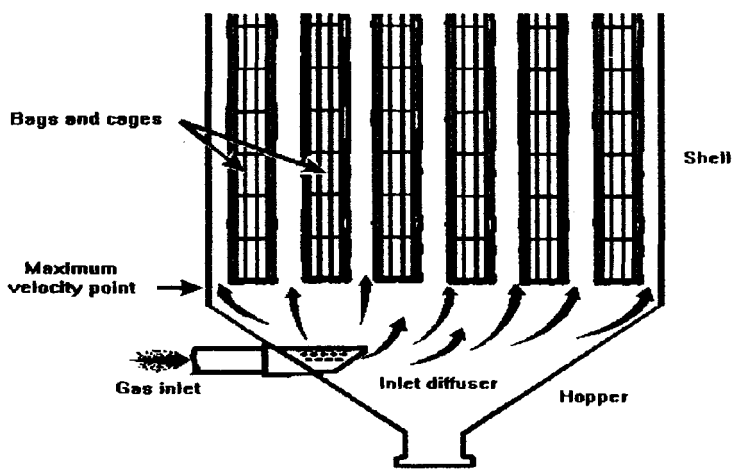
CAPITULO III

3. BASES TEORICAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRADO.

En una unidad de filtro de mangas el paso de gas con concentración de partículas a lo largo de la superficie de la tela se produce radialmente, causando que la materia particulada sea recolectada en la cara de contacto de la tela y el flujo de gas limpio salga a la atmósfera; los filtros de tela pueden estar en forma de láminas, cartuchos corrugados o cilindros, siendo este ultimo el de uso más común con un número de unidades individuales encasilladas en grupos. Generalmente a lo filtros de mangas son llamados casas de bolsas (baghouse) ya que la tela está configurada en forma de bolsas.

El filtro opera cíclicamente y alterna entre las fases de filtrado (duraciones relativamente larga) y de limpieza (duraciones cortas), con

cada ciclo de limpieza se remueve al menos parte de la capa de polvo atrapada en la bolsa durante la filtración y se aflojan algunas partículas que permanecen en la tela (5). Cuando se reinicia la filtración, la capacidad de filtrado es disminuida porque se pierde parte de la capa de polvo; por consiguiente las partículas sueltas son forzadas a ingresar a través del filtro por el flujo de gas que ingresa provocando una leve fuga de estas; a medida que se capturan más partículas la eficiencia de filtración aumenta hasta el siguiente ciclo de limpieza, la capa de polvo o pastel de polvo (cake) que se forma en la bolsa es principalmente responsable para obtener altas eficiencias tales como de 99 a 99.9% para telas nuevas (3) y (5), la descripción del proceso de filtración se ilustra en la Figura 3.1.



Fuente [4]

Fig. 3.1 Proceso de Filtración

La concentración de partículas a la salida del filtro es casi constante mientras que es más probable que la eficiencia global varíe con la carga de partículas; por esta razón, las casas de bolsas pueden considerarse como equipos con concentración constante a la salida y no como equipos de eficiencia constante (6); la concentración constante a la salida se obtiene debido que en cualquier momento dado parte de los filtros de tela están siendo limpiados, además la eficiencia de recolección o recuperación está variando constantemente como resultado del mecanismo de limpieza utilizado en el filtro (6).

La mayor parte de la energía usada para la operación del sistema aparece como caída de presión a través de las bolsas, estructura asociada y ductos; la aplicación práctica de los filtros de mangas requiere el uso de una gran superficie de tela para evitar una caída de presión inaceptable a través de las bolsas. El tamaño de la casa de bolsas para una unidad en particular se determina por la selección de la relación del flujo volumétrico de aire a la superficie del tejido llamada "velocidad de filtración" (relación aire a tela) que depende de la carga (concentración), características de la materia particulada y del método de limpieza utilizado. El funcionamiento de las casas de bolsas está determinado entre otros factores, por la tela seleccionada, frecuencia de limpieza, eficiencia de colección y eficiencia de recuperación.

3.1 Determinación del Modelo Matemático del Mecanismo de Filtrado

En la filtración por tela, el modelo inicial podría ser el de una esfera móvil que se acerca a un cilindro estacionario; sin embargo, una ves que se adhiere una capa inicial de polvo retenido, la geometría se hace muy complicada (8). El polvo retenido así como las fibras de la tela actúan como blancos para el deposito de las partículas adicionales; no obstante, el punto inicial razonable para un modelo de filtración sería considerar *la impactación de las esferas sobre cilindros* (8). La eficiencia creciente de colección para los filtros de mangas depende de la formación de esta capa de polvo en la superficie colectora de la bolsa llamada pastel (cake) durante el proceso de filtración, pero provoca la resistencia al flujo de gas generándose una alta caída de presión.

La caída de presión total a través de una casa de bolsas (baghouse), durante la operación de filtrado esta dada por la caída de presión a través de la tela, a través de la capa de polvo formado en las bolsas y a través de la estructura, que se la puede expresar como (3):

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s \qquad \text{Ec. 3.1}$$

donde: ΔP = caída de presión total

ΔP_f = caída de presión a través de tela limpia

ΔP_p = caída de presión a través de pastel de polvo

ΔP_s = caída de presión a través de estructura

la caía de presión a través de la estructura es baja por tanto se la considera despreciable.

Para reducir la caída de presión a un valor razonable es necesario limpiar periódicamente el filtro aplicando uno de los mecanismos de limpieza que se mencionarán más adelante. La caída de presión tanto para el filtro limpio como para la formación de la capa de polvo se la puede representar por medio de la ecuación de Darcy, aplicable para flujo de fluidos a través de medios porosos; en forma general (8):

$$\frac{\Delta P}{X} = \frac{V * \mu_g}{K} \qquad \text{Ec. 3.2}$$

donde: X = profundidad del filtro o de la capa de polvo

K =permeabilidad del filtro o de la capa de polvo

μ_g = viscosidad del gas

V = velocidad superficial de filtración

La caída de presión total se la puede escribir en términos de la ecuación de Darcy como (8):

$$\Delta P = \frac{X_f * \mu_g * V}{K_f} + \frac{X_p * \mu_g * V}{K_p} \qquad \text{Ec. 3.3}$$

Donde los subíndices f y p indican la tela limpia y la capa de polvo respectivamente. La caída de presión de la tela limpia debe ser esencialmente constante, por tanto, la caída de presión total depende de la variación en la caída de presión de la capa de polvo según se vaya acumulando ésta sobre la tela; es decir, ΔP_p varía en función del espesor de la capa de polvo X_p , y ésta a su vez en función del tiempo de operación t.

El espesor de la capa de polvo crece a medida que transcurre el tiempo de operación, la masa de polvo acumulada en el tiempo t equivale al gasto volumétrico multiplicado por dicho tiempo y por la carga de polvo en la corriente de gas; sin embargo esta masa también equivale a la densidad de la capa sobre la superficie del filtro multiplicado por el volumen de la capa recolectada en el tiempo t (8). igualando estas equivalencias se llega a la siguiente expresión:

$$\text{Masa recolectada} = (V * A) * (t) * (C_d) = \rho_L * (A * X_p)$$

Se tiene entonces una expresión para el incremento del espesor:

$$X_p = \frac{C * V * t}{\rho_L} \qquad \text{Ec. 3.4}$$

donde: C = carga de polvo o concentración

V = velocidad superficial de filtración

t = de operación

ρ_L = densidad de la capa de polvo

Remplazando la ecuación 3.4 en 3.3 y ordenando se obtiene (8):

$$\Delta P = \frac{X_f * \mu_g}{K_f} * V + \frac{\mu_g}{K_p * \rho_L} * (L * V * t) * V \qquad \text{Ec. 3.5}$$

La relación entre la caída de presión total y la velocidad superficial de filtración se conoce como el arrastre a través del filtro; dividiendo la ecuación anterior parta la velocidad de filtración, se obtiene (3):

$$\mathbf{S = K_1 + K_2\ W} \qquad \text{Ec. 3.6}$$

donde : S = arrastre del filtro; (pa-min / m)

$K_1 = (X_f * \mu_g) / (60 * K_f)$; (pa-min / m)

$K_2 = (\mu_g) / (60 * K_p * \rho_L)$; (pa-min-m / kg)

W = densidad de área de polvo, (L* V* t); (g / m^2)

El modelo lineal presentado por la ecuación 3.6, es llamado también como *modelo de arrastre del filtro* , la evaluación de los parámetros K_1 y K_2 , es inapropiado debido que no se puede obtener tan fácilmente los valores de permeabilidad de la capa de polvo como de la tela limpia; para poder obtener el arrastre en el filtro se escribe la ecuación anterior como (3):

$$\mathbf{S = K_e + K_s\ W} \qquad \text{Ec. 3.7}$$

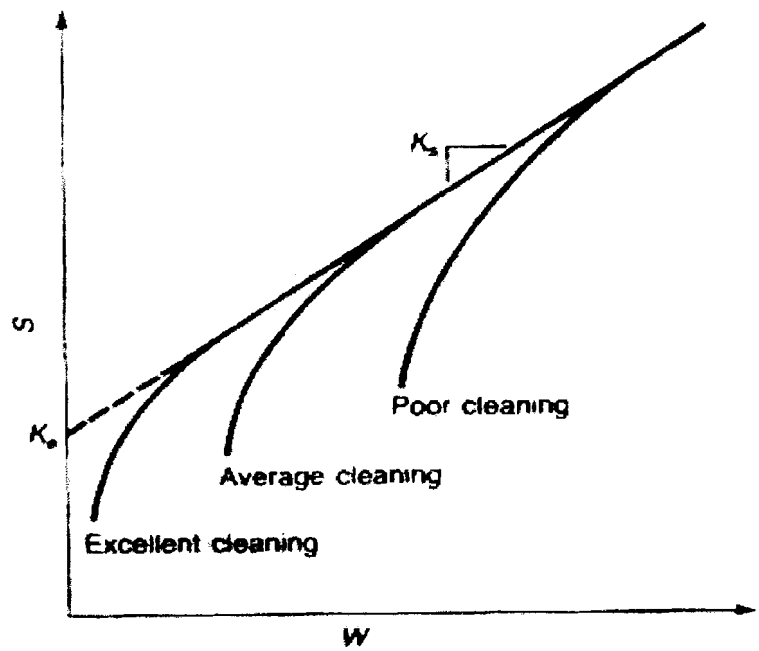
donde : K_e = valor extrapolado del filtro limpio

K_s = la pendiente; constante de las partículas de polvo, gas y tejido implicados en filtración.

Las constantes K_e y K_s son obtenidas empíricamente en un banco de pruebas durante "*la prueba de filtración*" en la cual se toman las caídas de presión para diferentes intervalos de tiempos de operación con una concentración determinada; cabe señalar que es muy difícil simular las condiciones reales de operación del filtro, por tanto, los resultados obtenidos en el banco de pruebas son algo diferentes de los valores medidos en el equipo ya construido (5).

la Figura 3.2 muestra la curva de funcionamiento típica de un filtro de mangas como el arrastre del filtro en función de la densidad de área de polvo; al inicio del proceso el flujo a través de la tela no es uniforme por lo cual la porción inicial de la curva no es lineal, en

esta parte se forma el pastel de polvo de una forma irregular; a medida que transcurre el tiempo de filtrado, el arrastre se incremente linealmente al aumentar la densidad de área del polvo "W" hasta el máximo arrastre permisible donde se inicia la limpieza de las manga en un tiempo muy corto para luego reiniciar la filtración, completando así el ciclo general de filtrado; la parte lineal de la gráfica se la conoce como *zona de filtración efectiva.*



Fuente [3]

Fig. 3.2 Curva Típica de Funcionamiento

Un excelente filtrado se da cuando al inicio de la filtración se tiene el aumento de presión y por tanto el aumento del arrastre, el alejarse de este punto disminuye la capacidad de filtración del equipo dando una regular o pobre filtración (3).

3.1.1 Velocidad de Filtración (Relación Gas - Tela).

La velocidad de filtración utilizada para obtener la caída de presión total se la conoce como la relación gas - tela, que se la define como la razón entre el gas filtrado de un metro cúbico por minuto y el medio filtrante de un metro cuadrado de área; se la expresa como:

$$V_f = \frac{Q}{A_{nt}} \qquad \text{Ec. 3.8}$$

donde: V_f = relación gas a tela (velocidad de filtración)

Q = caudal del gas con concentración de partículas

A_{nt} = área neta de tela de filtración

Esta relación es un factor importante en el diseño de las casa de bolsas ya que determina la cantidad de área de tela necesaria para la filtración, particularmente esta relación varía de a cuerdo al tipo de limpieza que se aplique en el equipo.

3.1.2 Eficiencia de Colección.

Es un parámetro que se emplea para indicar el nivel de operación de un equipo de control para limpieza de aire que se define como:

$$\eta_o = \frac{C_i - C_o}{C_i} * 100 \qquad \text{Ec. 3.9}$$

donde: C_i = concentración de partículas a la entrada

C_o = concentración de partículas a la salida

La operación de filtrado debe estar entre 99 y 99.9% de eficiencia para satisfacer la necesidad planteada.

3.2 Descripción General del Sistema de Filtración por Mangas

Las casa de bolsas tienen dos fases de operación las cuales son la fase de filtración del gas y la fase de limpieza de las mangas que en conjunto forman el ciclo de limpieza. La fase de filtración se basa principalmente en la caída de presión que genera la tela o elemento filtrante y la capa de polvo que se forma en la tela durante la filtración, estas caídas de presión se las expresa en términos de la ecuación de Darcy y además están enmarcadas dentro de la ley de Stokes como se ha explicado.

Para esta fase se requiere de la estructura principal hermética donde se colocan dichas mangas, del conjunto de mangas y del sistema de succión para introducir al gas con alta concentración de polvo por el filtro.

La fase de limpieza de mangas depende del método o mecanismo que se utilice de acuerdo a la aplicación deseada, estos métodos son a saber: limpieza por sacudimiento mecánico, por flujo de aire reverso y por inyección de aire a presión por el interior de las mangas (pulse - jet); que se describirán más adelante y se seleccionará el método adecuado con los criterios de continuidad de operación, espacio utilizable y falta de necesidad en el uso de compartimentos de limpieza adicionales.

3.2.1 Cuerpo Principal.

A los equipos de filtración se los conoce también como casa de bolsas porque se colocan las bolsas en grupo dentro de una estructura; esta estructura debe ser hermética para evitar fugas de polvo, existen estructuras cilíndricas y cubicas que se seleccionan por el espacio disponible para el filtro pues las estructuras cilíndricas ocupan espacios relativamente pequeños.

Esta estructura se separa en una cámara de aire sucio donde ingresa el flujo de gas con alta concentración para ser filtrado, y en una cámara de aire limpio por donde sale el gas ya limpio hacia la atmósfera a través del porta – mangas en el cual se encuentra sostenido el sistema de mangas.

3.2.2 Sistema de Mangas

Las mangas utilizadas para el diseño del filtro son de forma cilíndrica siendo las más comunes en mercado y más fáciles de fabricar, cada manga es cocida en forma de bolsa que es colocada sobre una estructura cilíndrica llamada canastilla que sirve para mantener su forma y obtener una cierta rigidez durante la filtración y limpieza del sistema.

El arreglo del sistema de mangas es en forma de hileras paralelas que se encuentran sujetadas en una plancha metálica llamada porta – mangas a través de la unión con la canastilla.

3.2.3 Sistema de Limpieza de Mangas

Los filtros de tela pueden ser clasificados a través de varias características, como lo es el tipo de limpieza, dirección de flujo de gas (hacia dentro de la bolsa, hacia el exterior o viceversa), localización del sistema de ventilación (succión o presión) o tamaño (baja, media, o alta cantidad de flujo de gas); de estas cuatro características, el método de limpieza es la más distinguida para su clasificación (5), por tanto, las casas de bolsas se clasifican en filtros de sacudimiento mecánico, de flujo invertido y en filtros pulse - jet.

Limpieza por Sacudimiento Mecánico:

En este sistema las partículas se recogen por el interior de las bolsas las cuales estas conectadas a un sistema mecánico que genera un movimiento ondulatorio provocando el desprendimiento de la capa de polvo que es colectada en la tolva de almacenamiento. Para realizar el sacudimiento de limpieza se requiere cortar el ingreso de gas hacia su interior, motivo por lo cual estos tipos de filtros se construyen con varios compartimentos saliendo uno fuera de operación para ser limpiado y el resto sigue operando.

La construcción de varios compartimentos provoca que estas casas de bolsas sean demasiado voluminosas y ocupen grandes espacios.

Limpieza por Flujo Invertido:

Las partículas se recogen de modo similar al método se sacudimiento mecánico, en el momento apropiado se corta el flujo de aire contaminado al compartimento y el aire para la limpieza fluye a través de las bolsas en dirección opuesta al flujo que ingresa, provocando el derrumbamiento de la capa de polvo.

Ambos sistemas tienen similar ciclo de limpieza, es decir, se tiene que cerrar el ingreso de aire para su limpieza por lo que se construyen con varios compartimentos, además su método de filtración se basa en la formación de la capa de polvo en las mangas permitiendo al inicio de la filtración una baja eficiencia de colección; sin embargo operan con una baja caída de presión debido a la pequeña relación gas - tela que se usa para el diseño.

Limpieza Pulse - Jet:

Durante el proceso de filtrado de este sistema, el gas con alta concentración de polvo ingresa al filtro por la cámara de aire sucio colectándose dicho polvo en la parte exterior de las mangas; el aire ingresa por el interior de las mangas sin partículas hacia la cámara de aire limpio que luego es expulsado a la atmósfera. Esta forma de limpieza usa aire comprimido que pasa por el interior de cada manga a través de un venturi o tobera creando un aire secundario para generar una onda de choque que provoque el sacudimiento violento de la tela y desprender la capa de polvo formada (5).

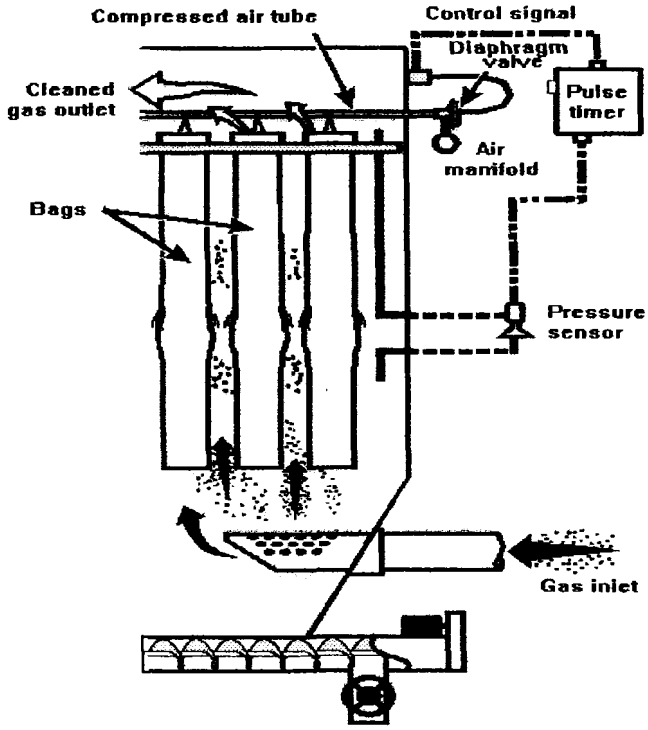
Los impulsos de aire comprimido son procedentes de un tubo inyector situado por encima de las mangas; este tubo está

cerrado por un extremo y abierto en la parte contraria que sale al extremo de la cámara de aire limpio para conectarse a la válvula solenoide o electroválvula y esta a su vez conectarse al controlador de tiempo "timer", el cual regula el intervalo entre disparos y duración de los mismos. La masa de partículas desprendidas de las mangas es recolectada en la tolva de colección, pudiendo ser reciclado al proceso por un mecanismo de transporte como un tornillo sinfín o por un sistema neumático, etc.

En el proceso de limpieza no se necesita cortar el ingreso de gas al filtro ya que el pulso de aire se aplica durante unos pocos instantes y no afecta el libre paso de gas, dándose un *ciclo de filtración continua.* La figura 3.3 describe el funcionamiento de este sistema de limpieza.

Una ventaja del sistema de limpieza pulse - jet comparado con el de sacudimiento mecánico y de flujo invertido es la reducción de tamaño del baghouse permitiendo usar menos tejido debido a su alta relación gas - tela y no teniendo que construir un compartimento extra para la limpieza fuera de operación. Sin embargo, esta alta relación causa caídas de presión elevadas que aumentan los costos de operación, pero

son compensados con la reducción de costo en el tamaño y en la aplicación requerida para ciclo continuo.



Fuente [5]

Fig. 3.3 Funcionamiento del sistema se limpieza pulse – jet

3.2.4 Colector de Partículas

Son usados para colectar el polvo que ha sido removido en el proceso de limpieza para luego ser transportado al proceso de producción si este es recuperable; son diseñados usualmente con 60° de inclinación para permitir que el polvo se desplace hacia el colector y descargarlo al proceso.

3.2.5 Sistema de Succión

El gas ingresa al filtro por el efecto de succión o soplado que es generado por acción de un ventilador; cuando el gas de concentración es empujado contra el sistema de mangas se dice que se tiene una casa de bolsas de presión positiva, por tanto el ventilador es del tipo soplante y se localiza al ingreso del gas. Cuando el gas es absorbido a través del sistema de mangas se tiene una casa de bolsas de presión negativa, por consiguiente el ventilador se encuentra en la zona de salida del gas limpio, es decir, en la zona de aire limpio; este ventilador es del tipo centrífugo o aspirante ya que se requiere absorber una gran cantidad de caudal a través de una fuerte resistencia que es el sistema de mangas y la capa de polvo formada en él (4),(5).

Las casas de bolsas de presión positiva generalmente son menos costosas porque solo tienen que soportar la presión diferencial a través del tejido, su desventaja radica en que el ventilador se coloca en la zona de aire sucio y por tanto está expuesto a los gases sucios donde la abrasión es muy alta sobre sus paletas. En cambio en las casa de bolsas de presión negativa donde el ventilador se coloca en la zona de

salida del gas limpio se evita el problema de abrasión y se permite el uso de ventiladores más eficientes, sin embargo, deben resistir altas presiones negativas y por ende su construcción es más resistente (5); el filtro tipo pulse - jet es una casa de bolsas de presión negativa por cuanto se utiliza un ventilador del tipo centrífugo.

Una vez descritos los sistemas de limpieza se necesita seleccionar el más adecuado considerando la necesidad planteada inicialmente; es decir se requiere que el filtro opere continuamente y ocupe un espacio relativamente pequeño, por tanto se evalúa de acuerdo a los siguientes criterios de solución como se muestra en la Tabla IV.

Tabla IV

Tabla de Valoración para Selección del Sistema de Limpieza.

Tipo de Limpieza	Funcionamiento Continuo	Colección Continua	Espacios Pequeños	Total
Sacudimiento Mecánico	40 10	40 20	20 5	100 35
Aire Reverso	15	25	10	100 50
Pulse – Jet	**35**	**38**	**20**	**100** **93**

En la tabla anterior se aprecia que el sistema de limpieza pulse – jet es seleccionado para su aplicación por tanto el filtro que se necesita utilizar es del tipo pulse – jet que opera con un ventilador centrífugo.

CAPITULO IV

4. DISEÑO DEL FILTRO

Las casas de bolsas con sistemas de limpieza del tipo temblador mecánico o de flujo reverso normalmente usan la tela tejida en la cual la filtración se da por la formación de pastel en ella; es decir, el tejido sirve meramente como un substrato para la formación del pastel de polvo siendo este el medio de filtración real (5); además tienen relaciones de gas - tela (velocidad de filtración) relativamente bajas.

En cambio, en casa de bolsas que usan el sistema pulse - jet se usa tela de fieltro (afelpada) y tienen altas relaciones de gas a tela, generalmente al doble de los sistemas anteriores; la tela de fieltro juega un papel más activo en el proceso de filtración ya que en este no solo el pastel que se forma actúa como medio filtrante, sino también el fieltro; es decir, la formación del pastel de polvo es mucho mas rápida (5).

Esta distinción entre la filtración de pastel y la filtración de fieltro tiene implicaciones importantes para la relación de perdida de presión por las bolsas del filtro (5); la descripción teórica y proceso de diseño entre estos dos métodos de filtración son bastante diferentes, sin embargo se realiza el análisis para la filtración de polvo – fieltro (de no pastel) ya que se ha seleccionado el sistema pulse – jet. La *"prueba de filtración"* que se realiza en un banco de pruebas es para obtener la caída de presión a través de la tela, la descarga de pastel durante la limpieza, la eficiencia de colección y el periodo de filtración y limpieza.

4.1 Descripción de los Criterios de Diseño

La distinción entre las casas de bolsas pulse - jet y casas de bolsas con temblador mecánico o de flujo reverso es básicamente la diferencia entre la filtración compuesta de polvo - fieltro (filtración no pastel) y la filtración de pastel respectivamente (5). La filtración de polvo - fieltro se da al inicio del proceso de filtración en una filtración profunda, luego cambia a filtración de pastel que inevitablemente es el resultado de la recolección del polvo en el filtro (5).

Durante la operación de limpieza continua de las mangas en el filtro pulse - jet sólo un fragmento pequeño del polvo removido de la bolsa cae en la tolva de colección, el resto del polvo desalojado será redepositado en la bolsa por el flujo de gas que sigue ingresando al

filtro. La capa de polvo redepositada tiene diferentes características de caída de presión que el polvo últimamente depositado (1), (5). El trabajo modelado para enfocar la característica de limpieza continua (en-línea) fue desarrollado por Dennis y Klemm que propusieron el modelo siguiente de arrastre para un filtro de mangas tipo pulse – jet (1), (5):

$$S = S_e + (K_2)_c\, W_c + K_2\, W_o \qquad \text{Ec. 4.1}$$

donde: S = arrastre por el filtro

S_e = arrastre de filtro sólo - limpio

$(K_2)_c$ = la resistencia especifica del polvo reciclando

W_c = la densidad de área del polvo reciclando

K_2 = la resistencia especifica del polvo del polvo recientemente depositado.

W_o = la densidad de área del polvo últimamente depositado.

Este modelo es similar al modelo lineal de arrastre del filtro* con la ventaja en que se pueden considerar fácilmente las tres fases de filtración que se dan en un baghouse pulse - jet, las cuales son: *filtro limpio, polvo redepositado y polvo nuevo depositado*; sin embargo, los valores de S_e, $(K_2)_c$ y W_c pueden asumirse como constantes para poder agruparse como (1), (5):

$$\Delta P = (PE)_{\delta w} + K_2\, W_o\, V_f \qquad \text{Ec. 4.2}$$

---

* Ver subcapítulo 3.1, pag. 68

donde: ΔP = caída de presión total

V_f = velocidad de la filtración

$(PE)_{\delta w} = [S_e + (K_2)_c W_c]V_f$

Esta ecuación describe el comportamiento de la caída de presión de una manga individual, pero determina también la caída de presión de la casa de bolsas debido que el arreglo de las mangas se encuentra el paralelo; es importante indicar que esta ecuación se la obtiene del concepto de arrastre aplicado a la filtración, pues se tiene que dicho arrastre es igual a la razón entre la caída de presión y la velocidad de filtración .

Parece razonable extender este análisis al caso cuando el polvo es irregularmente distribuido en la manga, entonces se aplica la ecuación 4.1 a cada área en la bolsa para computar el arrastre global de la misma; la dificultad siguiendo este procedimiento es que se debe asumir valores de W_c para cada área diferente a ser modelada. La desventaja del modelo representada por las ecuaciones 4.1 y 4.2 es que las constantes, S_e, $(K_2)_c$, y W_c, no pueden predecirse tan fácilmente; por consiguiente, correlaciones de datos de laboratorio se deben usar para determinar el valor de $(PE)_{\delta w}$ (5).

Para la combinación del polvo - tejido de Dacron afelpado, Dennis y

Klemm desarrollaron una relación empírica que involucra a $(PE)_{\delta w}$ con la relación gas - tela (velocidad de filtrado) y la presión de limpieza de pulso; esta relación (convertida de las unidades métricas a las inglesas) es como sigue (5):

$$(PE)_{\delta w} = 6.08\ V_f\ P_j^{-0.65} \qquad \text{Ec. 4.3}$$

donde: V_f = la velocidad de filtración, (ft/min)

P_J = la presión del pulso de limpieza

Esta ecuación es esencialmente un ajuste de la regresión para una cantidad limitada de datos de laboratorio y no debe ser aplicado a otras combinaciones de polvo – tejido (1); la presión de pulso que se utiliza en la limpieza normalmente se aplica entre 60 y 100 psig.

Relación Gas - Tela (Velocidad de Filtración):

La clave del diseño para una casa de bolsas pulse - jet es determinar la relación gas – tela; es decir, obtener la velocidad de filtrado que produce el óptimo equilibrio entre la caída de presión (los costo de operación aumentan como aumenta la caída de presión) y el tamaño del baghouse (costo importante que disminuye como se reduce el tamaño del baghouse) (5). El tamaño del Baghouse pulse - jet se reduce a medida que la velocidad de filtración es aumentada, sin embargo, esta alta relación produce

caídas de presión más altas que afectan su costo, pero es compensado con la reducción de tamaño, ventaja en la operación continua y evitando la construcción de un compartimento extra para la limpieza "fuera de línea" como sucede con los otros sistemas de limpieza. Los principales factores que afectan la proporción de gas - tela de diseño, son: el tipo de contaminante que se quiere filtrar, tipo de aplicación del filtro, temperatura del flujo de gas y la concentración o carga del contaminante en el aire.

La proporción de gas - tela es difícil de estimar al principio; sin embargo, existen dos métodos de dificultad creciente que permiten una evaluación rápida distinguiéndose a continuación:

- Después que un tejido se ha seleccionado, una proporción de gas - tela inicial puede predecirse usando valores tabulados como se tiene en el apéndice H* (5); estos valores son todos proporciones netas igual a la relación de flujo total en pies cúbicos por minuto dividido para el área neta de tela en pies cuadrados (1). Esta proporción, en unidades de pies por minuto, afecta la caída de presión y la vida de las bolsas; el área neta de tela es determinada dividiendo el caudal de entrada o capacidad de flujo filtrable en pies cúbicos reales por minuto (acfm) para la proporción de gas - tela de diseño.

---

* Tabla D

- Los fabricantes han desarrollado ecuaciones y gnomogramas que permiten obtener la relación gas - tela para baghouses pulse - jet, en las cuales se relacionan la temperatura de operación, tamaño de la partícula, carga del polvo y aplicación ; para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$V_f = 2.878\ A\ B\ T^{-0.2335}\ C^{-0.06021}\ (0.7471 + 0.0853\ ln\ D) \qquad \text{Ec. 4.4}$$

donde: V_f = proporción de gas - tela

A = factor de material, apéndice H**

B = factor de aplicación, apéndice H**

T = temperatura de operación, (entre 50 y 275 °F)

C = carga de polvo a la entrada (entre 0.05 y 100 gr/ft^3)

D = diámetro de partícula (entre 3 y 100 µm)

Para las temperaturas por debajo de 50 °F, se usa T = 50 pero se tienen una exactitud disminuida; para temperaturas sobre los 275 °F, se usa T = 275; para la masa de partículas de diámetros menos de 3 µm, el valor de D es 0.8, y para los diámetros mayor que 100 µm, D es 1.2; en cargas de polvos menores a 0.05 gr/ft^3, se usa C = 0.05 y para cargas de polvos sobre 100 gr/ft^3, usar C = 100. Las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4 se obtuvieron de forma empírica por tanto se deben respetar las unidades con las cuales se han originado, siendo estas las del sistema americano.

** Tabla C

Caída de Presión:

La caída de presión para las bolsas puede calcularse aplicando las ecuaciones 4.2 y 4.3 dadas en la sección precedida si los valores de los varios parámetros relacionados son conocidos; frecuentemente estos no se conocen, pero una máximo caída de presión de 2 a 10 plg. H_2O a través del baghouse y 10 a 20 plg. H_2O a través del sistema completo puede asumirse si contiene muchos conductos de trabajo. Aplicando las ecuaciones anteriores y dejando la caída de presión en función del tiempo de filtración se obtiene el comportamiento de un baghouse pulse - jet con la siguiente ecuación:

$$\Delta P = 6.08\, V_f\, P_j^{-0.65} + K_2\, V^2\, C_i\, \theta \qquad \text{Ec. 4.5}$$

donde: ΔP = la caída de presión total por el filtro

V_f = velocidad de filtración o proporción gas - tela

K_2 = el coeficiente de resistencia específico del polvo {[plg. H_2O/(ft/min)] / (lb /ft^2)}

C_i = la concentración de polvo de entrada al filtro (lb/ft^3)

θ = tiempo de filtración (min)

Aunque hay mucha variabilidad, los valores de K_2 se encuentran desde 1.2 a 30–40 [plg. H_2O/(ft/min)] / (lb/ft^2)]; las concentraciones de entrada más comunes varían de menos de 0.05 a más de 100

gr/ft^3, sin embargo un rango casi típico es de aproximadamente 0.5 a 10 gr/ft^3 (5).

Los tiempos de filtración pueden ir de aproximadamente 20 a 90 minutos para baghouses de funcionamiento continuo, pero se encuentran más frecuentemente de 30 a 60 minutos. Debido a la construcción en plancha metálica para el baghouse, generalmente no satisface el servicio más severo por cuanto se tienen pequeñas fugas; sin embargo, para las aplicaciones especiales, puede construirse cáscaras de alta presión.

Caracteristica del Flujo de Gas:

La humedad y contenido de corrosividad son las mayores características del flujo de gas en las consideraciones de diseño requeridas; debe aislarse el baghouse y los ductos de trabajo asociados y posiblemente calentarlos si la condensación pudiera ocurrir; considerando los componentes de la tela deben manipularse con cuidado y protegerlos ya que pueden rasgarse y dañarse. Donde la corrosión estructural es probable, la substitución de acero puro por el acero blando puede requerirse, con tal de que los cloruros no estén presentes al usar el acero puro (serie 300), ya que la mayoría de los aceros austeníticos puros (stainles) son susceptibles a corrosión del cloruro.

Temperatura de Operación:

La temperatura del flujo y del contaminante deben permanecer por encima de su punto de rocío de cualquier flujo condensables; si la temperatura puede bajarse sin acercarse el punto del rocío, pueden usarse refrigeradores o aire de dilución para dejar caer la temperatura tal que la temperatura limite del tejido no sea excedida (5). Sin embargo, el costo adicional de un pre-enfriador tendrá que ser comparado con el costo más alto de bolsas con resistencia a mayor temperatura. En el apéndice G* se tiene una tabla donde lista algunos de los tejidos en uso actual y proporciona información sobre limites de temperatura y de resistencia química.

Características de las Partículas:

La distribución del tamaño de partículas y la adhesividad son las propiedades de la partícula más importantes que afectan a los procedimientos de diseño (5). Los tamaños de la partícula más pequeños pueden formar un pastel más denso que aumenta la caída de presión, el efecto del tamaño de la partícula de promedio decreciente da una proporción de gas - tela aplicable más baja. En partículas altamente adhesivas la filtración se produce mas rápido por ende se necesitan sistemas de limpieza de operación continua para evitar el aumento excesivo de la caída de presión.

---

* Tabla A

4.2 Evaluación de los Criterios de Diseño

Para poder realizar el diseño del filtro pulse – jet es necesario conocer las condiciones de entrada del flujo de aire que se va a filtrar, como son: su caudal, la concentración de partículas en dicho caudal, su temperatura a la que se encuentra, el diámetro de partículas representativo y el tipo de partículas que se va ha colectar; estas condiciones están en función del lugar donde va ha operar dicho filtro.

De acuerdo al lugar seleccionado para su utilización, estas condiciones son las siguientes:

- Caudal requerido = 3221 ft^3/min
- Concentración = 0.5 gr/ft^3
- Temperatura del gas = 140 °F
- Diámetro de partícula = 11μm
- Tipo de polvo = cemento

4.2.1 Determinación del Tipo Forma y Capacidad

El conjunto de manga y canastilla que se van a usar son del tipo cilíndricas debido a su mayor uso en el mercado; además la casa de bolsas (baghouse) se la considerará como una

forma cúbica debido al requerimiento de espacio en el lugar seleccionado.

Para poder determinar la capacidad de filtración del equipo es necesario calcular en primer lugar la velocidad de filtración que es pieza fundamental en el diseño como se explicó en la descripción de los criterios de diseño, para ello se procede a calcular dicha velocidad aplicando la ecuación 4.4 de los fabricantes norteamericanos con los siguientes parámetros necesarios respetando su sistema de unidades ya que es obtenida de forma empírica:

- A = 10 (cemento) apéndice H**
- B = 0.9 (línea de transporte) apéndice H**
- T = 140 °F (60 °C)
- L = 0.5 gr/ft^3
- d = 11 μm

$$V_f = 2.878 * (10) * (0.9) * 140^{-0.2335} * 0.5^{-0.06021} * [0.7471 + 0.0853 Ln(11)]$$

Vf =8.11 ft/min

Además esta velocidad se la puede seleccionar del apéndice H* con respecto al tipo de polvo y sistema de limpieza a usarse; en este caso el polvo es cemento y se usa el sistema

de limpieza pulse - jet por tanto la velocidad de filtración es 8 ft/min que corrobora el resultado anterior el cual será utilizado. Por consiguiente, el área neta de filtración se la obtiene tomando la razón entre el caudal de operación y la velocidad de filtración como sigue:

$$A_n = \frac{3221}{8.11} \Rightarrow$$

$$\boxed{A_n = 397.164\ ft^2}$$

La cual determina la capacidad efectiva de filtración y la cantidad de combinación "mangas – canastillas" que va ha tener el filtro diseñado.

4.2.2 Selección del Medio Filtrante

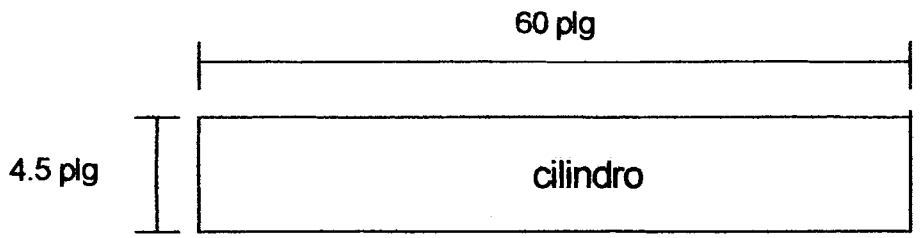
La determinación del tipo de tela y su dimensión dependen de las características de operación y sistema de limpieza que va ha estar sometida, y del proveedor o fabricante de quien se desee adquirir; se destacan a continuación dichas características:

- Temperatura de operación = 60^0C
- Punto de rocío = 26^0C
- Característica de cemento = alcalino y abrasivo
- Tipo de limpieza = pulse – jet

La tela debe ser del tipo fieltro debido al sistema de limpieza pulse – jet y del apéndice G* se aprecia que la tela adecuada es de fibra sintética porque cumple las condiciones de operación expuestas anteriormente. De acuerdo a la tabla B (apéndice G) se selecciona una tela de *16 onzas de polyester* con una relación de costo de $\$0.75/ft^2$, un diámetro de 4.5 pulgadas y una longitud de 60 pulgadas considerando la bolsa como un cilindro mucho más largo que ancho.

4.2.3 Determinación del Número de Mangas

De acuerdo a las dimensiones de la manga seleccionada se puede determinar el área total por manga calculando el área superficial de un cilindro como sigue:



- Diámetro = 4.5 plg
- Longitud = 60 plg

$A_{manga} = \pi * D * L$

$A_{manga} = \pi\ (4.5)(60) \Rightarrow$ **$A_{manga} = 848.23\ in^2$**

$$\boxed{A_{manga} = 5.89\ ft^2}$$

Una vez obtenida el área de la manga individual y el área neta de filtración se puede calcular el número real de mangas, que va ha operar dentro de la casa de bolsas de la siguiente manera:

$$N_{mangas} = \frac{A_{neta}}{A_{manga}} \Rightarrow N_{mangas} = \frac{397.164}{5.890}$$

$$\boxed{N_{mangas} = 68\ mangas}$$

Se considera que cada manga consta de su canastilla y venturi formado un conjunto llamado *"manga – canastilla"*.

4.2.4 Análisis del Sistema de Limpieza (Pulse – Jet)

En el sistema de limpieza pulse – jet es necesario saber cuantas válvulas solenoides son requeridas, para ello los fabricantes de estos sistemas han desarrollado gnomogramas que están en función del tiempo de apertura de la válvula (en milisegundos), la presión de descarga (de limpieza) y del número de mangas que va ha ser limpiado por cada válvula

(número de orificios en tubo inyector); determinando el arreglo de mangas adecuado que puede ser dispuesto en el filtro.

Consultando al fabricante SMC, con las siguientes condiciones de funcionamiento:

- Presión de limpieza = 80 psi (0.55Mpa)
- Tiempo de apertura = 250 ms
- Número de mangas = 68

se selecciona el arreglo ϕ7*10pcs que indica que cada válvula puede limpiar 10 mangas en un pulso de aire teniendo un diámetro de orificio de salida de aire presurizado de 7 mm; como el número de mangas calculado es de 68 por consiguiente, se deben usar 7 válvulas para dar un total de 70 mangas, siendo el valor más aproximado al número de mangas de diseño; cabe señalar que este arreglo no se encuentra en apéndice I pero al arreglo ϕ6*10 se le ha aumentado una manga más para obtener el arreglo anterior que es más real.

La válvula adecuada según el arreglo seleccionado (ϕ6*10) es VXF2160 de 1 pulgada que genera una relación de flujo alrededor de 12500 Lt/min necesario para cubrir las 6 mangas (apéndice I); pero consultando otro fabricante de válvulas se

selecciona la válvula 2V250-25AC110V (apéndice I) porque su relación de flujo es mayor que la primera válvula supliendo el arreglo ϕ7*10, es decir, el aumento de una manga más por válvula y además es menos costosa.

Del arreglo seleccionado se tienen 70 mangas, por tanto existe un caudal adicional que debe ser compensado en la selección del ventilador, este caudal es:

$$q = A_n * V_f \quad \Rightarrow \quad q = (70*5.89ft^2)*8.11ft/m$$

$$\mathbf{q = 3344\ cfm}$$

4.2.5 Determinación de la Caída de Presión de Diseño

Para poder establecer la caída de presión que se desarrollaría en el filtro es necesario partir de una caída de presión presumida y establecer las características de operación del tiempo de filtración, tiempo de limpieza y de la presión de pulso; el rango típico de caída de presión está entre 2 y 10 plg de H2O y asumiendo una caída de **4 plg de H2O.**

Las características de operación son:

- Tiempo de filtración = 60 seg (asumido)
- Tiempo de limpieza = 250 miliseg. (seleccionado)
- Presión de pulso = 80 psi (de acuerdo a la válvula seleccionada)

Aplicando la ecuaciónes 4.3 y 4.4, que combinan el proceso de filtración con el proceso de limpieza, y tomando un valor de Ks de 7 (rango de K_S 1.2 – 30 o 40 [plg H2O* ft* min] / lb) se tiene el siguiente calculo:

- Velocidad de filtración = 8.11 ft / min
- Presión de pulso = 80 psi

$(PE)_{\Delta w} = 6.08\ (8.11)(80)^{-0.65} \Rightarrow (PE)_{\Delta w} = 2.86$

$\Delta P = 2.86 + [7*(8.11)^2 * (0.5 / 7000) * 1] *$

$$\Delta P = 2.893 \text{ plg H2O}$$

$$\boxed{\Delta P = 3.0 \text{ plg H2O}}$$

Se aprecia que el resultado calculado con la ecuación anterior es diferente al valor asumido debido a las asunciones de Ks y del tiempo de filtración por lo que serán corroboradas en la prueba experimental.

4.3 Evaluación del Sistema de Succión

Para la generación del caudal que ingresa al filtro y por ende para la filtración, se selecciona el sistema de succión o de presión negativa que consta de un ventilador debiendo cumplir las siguientes características:

---

* 1 Lb = 7000 granos

- ventilador de succión
- tipo centrífugo
- aletas curvadas hacia atrás (de alta eficiencia; η = **0.7**)
- opera en zona de aire limpio (no sufre abrasión)

La potencia de consumo adecuada que necesita el ventilador depende de la resistencia que debe vencer o caída de presión y del caudal que debe generar como sigue:

$$P = \frac{q * \Delta p}{6356 * \eta} \Rightarrow P = \frac{3221 * 3}{6356 * 0.7}$$

P = 2.2 Hp

considerando que se tiene un caudal remanente por la selección del arreglo de válvulas se considera un adicional en la potencia; por ende la potencia necesaria es:

P = 2.5 Hp adecuado

4.4 Tabulación de Resultados

Los resultados del filtro diseñado de acuerdo a las condiciones expuestas anteriormente se los ha tabulado en la Tabla V como sigue:

Tabla V

Resultados de las Características de Diseño del Filtro

CARACTERISTICAS DE DISEÑO	RESULTADOS
Velocidad de Filtración	8.11 ft /min
Area Neta de Filtración	397.2 ft^2
Tipo de Tela	Polyester de 16 onzas
Dimensión Manga - Canastilla	ϕ = 4.5 plg.; L = 60 plg.
Area de Cada Manga	5.89 ft^2
Número de Mangas	68
Numero de Válvulas Solenoides	7
Tipo de Válvula	VXF2160 / 2V250-25AC110V
Caída de Presión Total	3 plg. H2O
Potencia del Ventilador	2.5 Hp

CAPITULO V

5. ANALISIS EXPERIMENTAL

Para poder desarrollar un diseño del filtro más específico se necesitan obtener datos de un prototipo construido de tal forma que reflejen los resultados en el equipo real. El alcance que lleva la construcción de este prototipo es para obtener de forma experimental:

1. La prueba de filtración, es decir la obtención de Ke y Ks
2. Eficiencia de colección global
3. Eficiencia de recolección promedio en tolva para un tiempo de operación determinado
4. Tiempo de operación del ciclo de filtrado y limpieza
5. Comprobación visual del comportamiento de las partículas durante la operación del filtro.

Al obtener los valores experimentales de las constantes Ke y Ks, y del tiempo optimo de filtrado se puede calcular la caída de presión real que se produce en el filtro diseñado; además las eficiencias obtenidas en el

prototipo, tanto de recolección en la tolva como de colección global reflejan los resultados que se obtendrían en el filtro ya construido.

5.1 Característica del Prototipo

Para la construir del prototipo se utiliza una combinación manga – canastilla de las mismas características utilizadas en el filtro real*, es decir:

- Material de tela = 16 onzas de polyester (fieltro)
- Dimensiones de manga - canastilla : D = 4.5 plg.

  L = 60 plg.

El caudal que se requiere en el prototipo es la razón entre el caudal total de diseño y el número de mangas calculadas; con respecto a la caída de presión total de diseño, esta es la misma para el prototipo ya que el arreglo de las mangas en el filtro real se encuentra en paralelo como se describió anteriormente, por tanto se obtiene el caudal por manga como sigue:

$$q_p = \frac{3221}{68} \qquad \Rightarrow \qquad \mathbf{q_p = 47.4\ cfm}$$

El uso en el prototipo de la misma combinación manga – canastilla del equipo real, el caudal obtenido por cada manga para el prototipo y la caída de presión total igual tanto para el prototipo como para el

---

* Apéndice J

filtro real son las características que aseguran la similitud entre el prototipo y el equipo real.

El sistema de limpieza pulse – jet par el prototipo consta de una válvula solenoide de 2 vías con tamaño de orificio de ½ plg. descrita como 2V-130-15-AC110V seleccionada del mismo fabricante para el filtro real (apéndice I); dicha válvula es manejada por una computadora a través de un control electrónico (timer) que regula el tiempo de apertura o de limpieza y el tiempo de filtración (Fig. 5.1). La presión para el pulso de limpieza es de 80 psi. siendo la misma presión de pulso de diseño suministrada por un compresor de aire.

a) b)

Fig. 5.1 a) Electroválvula de ½ plg.; b) Control de Prototipo

El ventilador de succión se encuentra en la zona de aire limpio, es de tipo centrífugo con un motor eléctrico de ¼ de Hp que se enciende a través de la computadora al dar la orden de inicio de secuencia de filtración (apéndice J). Las dimensiones generales del prototipo se describen en el plano I.

5.2 Datos y Resultados Obtenidos en la Prueba Experimental

El desarrollo experimental que se ha elaborado debe seguir un orden establecido para una mejor obtención de datos y resultados así, primeramente se procederá a obtener el caudal que el ventilador genera sin resistencia, luego se mide la concentración de polvo de cemento a la entra del filtro prototipo, sabiendo dicha concentración se procede a realizar la prueba de filtración para determinar las constantes Ke y Ks importantes en el análisis de filtración. Posteriormente se determina la eficiencia promedio de recolección en la tolva y por ende el tiempo óptimo de filtración; siguiendo, se calcula la caída de presión real con los resultados experimentales y se compara con el resultado calculado de forma teórica. Finalmente se calcula la eficiencia global de colección del filtro midiendo la concentración de polvo a la salida del mismo y se realiza un inspección visual del comportamiento de la combinación flujo de aire y polvo en el proceso de filtración y limpieza.

5.2.1 Obtención del Caudal

Para determinar el caudal que genera el ventilador en el prototipo se realiza la medición de velocidad promedio del flujo, para ello, la sección transversal de la tubería circular es dividida en varias circunferencias concéntricas para realizar la medición de velocidad en cada una de ellas utilizando el equipo de medición llamado *velómetro* que se lo introduce al interior de la tubería por un orificio el cual se encuentra en la zona de aire limpio alejado de los codos de desviación para evitar turbulencia durante la medición; posteriormente se calcula la velocidad promedio de acuerdo al número de mediciones que en este caso son cinco.

El caudal es igual a la velocidad promedio por el área de la sección transversal la cual es una circunferencia de diámetro de 102 mm. Cabe recalcar que al tomar las mediciones de velocidad no se encuentra la manga dentro de la estructura y tampoco está pasando polvo por el interior del filtro, por consiguiente, el caudal generado por el ventilador no tiene resistencia de tela y polvo. Las mediciones y la velocidad promedio se muestran a continuación en la Tabla VI.

Tabla VI

Mediciones de Velocidad para Cinco Tomas

# DE TOMAS	VELOCIDAD (fpm)
1	680
2	700
3	720
4	680
5	600
Promedio	**676**

diámetro de circunferencia = 102 mm

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 102mm^2}{4} \quad \Rightarrow A = 0.00866 m^2$$

$$A = 8659.04 \text{ ft}^2$$

$Q = V_m * A = 676 \text{ fpm} * 8659.04 \text{ ft}^2$

$$Q = 63 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

El ventilador utilizado para el prototipo genera un caudal de 63 cfm sin resistencia de tela y polvo como se expresó anteriormente; considerando una reducción de caudal del 20% por tal resistencia se llega aproximadamente al caudal deseado en prototipo, obteniendo un caudal real de:

Q_p = 50 cfm real

5.2.2 Obtención de la Concentración de Entrada

Se requiere simular una concentración de polvo (nube de polvo) que ingrese al filtro, para lo cual se ha adaptado un tanque donde se coloca la masa de cemento inicialmente pesada, el mismo que se encuentra conectado al ducto de entrada (apéndice J). Para genera la nube de polvo se utiliza un ventilado dentro del tanque y se ayuda aumento la agitación de forma manual.

En la obtención de la concentración se procede colocando a la entrada del ducto una mascarilla de papel filtro previamente pesada, luego se coloca el cemento de masa conocida en el tanque. Se acciona el equipo y se procede a la agitación del cemento provocando la nube de polvo que ingresaría al filtro, sin embargo es captada por la mascarilla de papel filtro; después de 10 minutos de operación se apaga el equipo y se deja de agitar, se pesa la masa de papel filtro con cemento colectado para obtener la masa de cemento colectada durante 10 minutos por diferencia de pesos de la mascarilla; este procedimiento se lo realiza cuatro veces para tener un flujo de masa promedio y llegar a una concentración promedio que es más adecuada.

Obtenido el flujo de masa promedio y sabiendo el caudal de entrada al filtro se calcula la concentración promedio como:

$$C = \frac{m_p}{Q} \qquad \text{Ec. 5.1}$$

donde: m_p es el flujo de masa promedio para 10 minutos

Q es el caudal del prototipo = 50 cfm

Los resultados son tabulados como sigue:

Tabla VII

Datos de Medición de la Masa Promedio en Papel Filtro para la Obtención de Concentración a la Entrada.

t operación (min)	Masa mascarilla (g)	Masa total (g)	masa polvo(g)
10	3	14.30	11.30
10	3	14.35	11.35
10	3	14.42	11.42
10	3	14.48	11.48
		PROMEDIO =	**11.4**

$$C = \frac{(11.4g/10min)}{1.416m^3/min} \Rightarrow \textbf{C = 0.8 g/m}^3$$

$$\textbf{C = 0.35 gr/pie}^3$$

Se puede observar que la concentración obtenida experimentalmente no es igual a la carga de polvo usada en el diseño real pero se aproxima, ya que las condiciones de laboratorio son diferentes a las del lugar de aplicación del filtro

real; por cuanto puede haber una ligera desviación de los resultados al realizar pruebas experimentales en el filtro real en operación comparadas con los resultados en un prototipo (4), (5).

5.2.3 Prueba de Filtración para Obtener las Constantes Ke y Ks

Conocida la concentración que se puede obtener y el caudal generado se procede a realizar la prueba de filtración, que consiste en la medición de la caída de presión durante el funcionamiento del filtro a medida que se va formando el pastel de polvo en la manga; durante esta prueba no se utiliza el sistema de limpieza.

Generando la nube de polvo como se describió anteriormente se acciona el filtro dejando pasar dicha nube a su interior; se fija un tiempo de operación de 30 minutos y las mediciones de caída de presión se las toma en intervalos de tiempo llamados tiempos de filtración; la primera medida se la hace a tiempo cero, es decir, sin ingreso de polvo al filtro que describe la caída de presión solo de la manga. Obtenidos estos datos se calcula la densidad de área de la formación del pastel y el arrastre en las partículas que se obtiene para cada intervalo de tiempo, de la siguiente manera:

Densidad de área $W = C * V_f * t$ Ec. 5.2

donde: $C = 0.8\ g/m^3$

$Vf = 2.53\ m/min$

t = intervalos de tiempo

Arrastre $S = \frac{\Delta P}{V_f}$ Ec. 5.3

donde: ΔP = caída para cada intervalo

Generando la siguiente tabla:

Tabla VIII

Datos de Caída de Presión Obtenidos Durante la Prueba de Filtración para Siete Intervalos de Filtración.

tiempo filtración (min)	Caída de presión (Pa)	Densidad de área (g/m^2)	Arrastre (Pa-min/m)
0	74.652	0	29.55
5	109.490	10.05	43.35
10	134.374	20.10	53.20
15	149.304	30.15	59.11
20	164.234	40.20	65.02
25	199.072	50.25	78.81
30	204.049	60.30	80.78

El gráfico Densidad Vs. Arrastre describe el comportamiento de la formación del pastel; como se observa en la Figura 5.2 se produce una curva de pendiente creciente que describe el

incremento del pastel en la manga provocando la filtración de pastel y por ende el aumento en la eficiencia de colección. Estos resultados corroboran la teoría de filtración que se ha descrito en el capítulo cuatro, por consiguiente del mismo gráfico se obtienen las constantes Ke y Ks a través de la linealisación y extrapolación de la curva como se aprecia en la Figura 5.2:

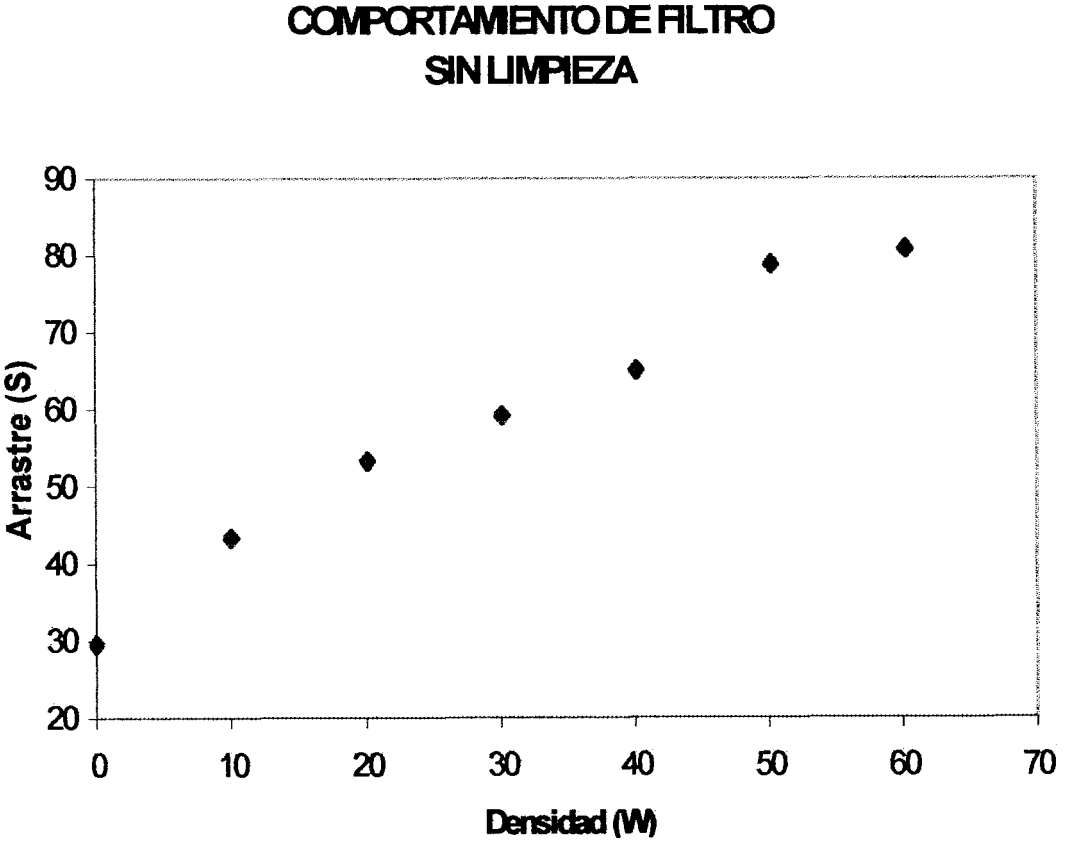


Fig. 5.2 Comportamiento de la Formación del Pastel a Través del Aumento del Arrastre en las Partículas

De la extrapolación se obtiene el valor de Ke:

- **Ke = 35 Pa-min / m**

De la pendiente de la curva linealisada se obtiene Ks:

- $K_s = \frac{(59.11 - 43.35)}{(30.15 - 10.05)} = 0.784$

- **Ks = 0.784 Pa-min-m / g**

Con las cuales se calcula la caída de presión real del filtro sin sistema de limpieza y con sistema de limpieza a través de las ecuaciones 3.7 y 4.5 respectivamente.

5.2.4 Determinación de la Eficiencia Promedio de Recolección y Tiempo de Filtración.

Para determinar si el equipo de filtración es adecuado para la recuperación de materia prima que es expulsada a la atmósfera durante el proceso de producción, es necesario saber cuan eficiente es; por consiguiente se determina la eficiencia de recolección en la tolva utilizando el sistema de limpieza pulse – jet para un tiempo óptimo de filtración dado por el tiempo de secuencia de pulsación o limpieza de la válvula regulada por la computadora.

En el tanque simulador se coloca la misma cantidad de polvo

inicial (cemento) y se utiliza el mismo procedimiento para generar la nube de polvo que se ha utilizado para las pruebas anteriores con el fin de evitar algún cambio en la concentración obtenida; se deja operar por un cierto tiempo el equipo para que se forme el pastel y se aplica un pulso de limpieza de aire para dejar un pastel definitivo en la manga. Se arranca la prueba dejando operar al filtro durante 30 minutos previamente calibrado el tiempo de apertura de la válvula y el tiempo de filtración o intervalo de limpieza.

Al término de este tiempo de operación se apaga el equipo y se procede a pesar la masa final de polvo que quedó en el tanque y la masa de polvo recolectada en la tolva que fue desprendida de la manga por el sistema de limpieza para obtener la masa real que ingresa al equipo y con ello calcular su eficiencia de la siguiente forma:

$$e_r = \frac{m_t}{\Delta m_i} * 100 \qquad \text{Ec. 5.4}$$

donde: e_r = eficiencia de recolección en tolva

m_t = masa de polvo colectada en tolva

m_1 = masa inicial en tanque

m_2 = masa final en tanque

$\Delta m_i = m_1 - m_2$

Este procedimiento se lo realiza cuatro veces con diferentes tiempos de filtración calibrados pero con el mismo tiempo de apertura de válvula arrojado los resultados que se indican en las Tablas IX y X.

Tabla IX

Datos de Pesaje de Masa en Tanque y Tolva

t filtración (min)	masa 1 (g)	masa 2 (g)	Δ mi (g)	Masa tolva (g)
0.08	1881.2	1659.8	187.6	141.1
0.18	1800.9	1461.0	339.9	243.7
0.25	1714.8	1266.0	448.8	298.2
0.50	1564.2	1056.4	507.8	322.5

Tabla X

Resultados de Eficiencias a Diferentes Tiempos de Filtración

t filtración (min)	Eficiencia (%)	t pulso (ms)	t operación (min)
0.08	75.21	250	30
0.18	71.70	250	30
0.25	66.45	250	30
0.50	63.50	250	30

A través del gráfico tiempo de filtración Vs eficiencia de recolección se obtiene el tiempo óptimo de filtración ingresando por la eficiencia promedio el cual es:

$$\eta_r \text{ promedio} = 69.22\ \%$$

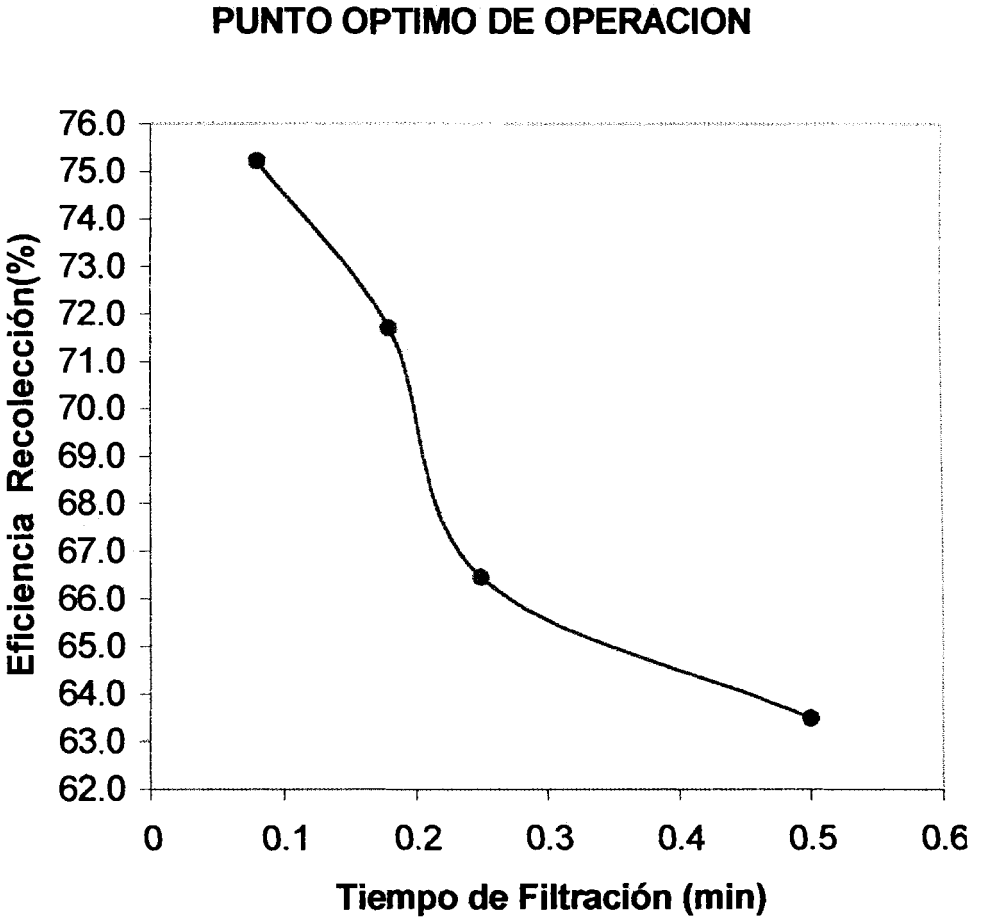


Fig. 5.3 Gráfica del Punto Óptimo de Operación

De acuerdo al gráfico, el tiempo óptimo de filtración al que va ha operar el filtro diseñado es:

Tiempo Óptimo = 0.22 min

Con una eficiencia de recolección promedio de 69.22 % se considera que el filtro opera adecuadamente en el proceso de recuperación de materia prima.

5.2.5 Determinación de la Eficiencia de Colección Total

Esta eficiencia determina la característica de funcionamiento del filtro como se describe en el capítulo cuatro, pues depende de la concentración a la entrada y a la salida cuando este funciona completamente (combinación de filtración y limpieza pulse – jet); por consiguiente es necesario saber la concentración a la salida, para ello se aplica un procedimiento similar al utilizado en la obtención de la concentración a la entrada con la diferencia en la colocación del papel filtro (mascarilla) en el ducto de salida de aire limpio (zona de aire limpio) y dejando operar al equipo completo de filtración durante 10 minutos con el sistema de limpieza calibrado a un tiempo de filtración y de apertura de válvula de 0.22 minutos y 250 milisegundos respectivamente siendo este el punto de operación del filtro. Los resultados se aprecian en la Tabla XI.

Tabla XI

Datos de Medición de la Masa Promedio en Papel Filtro para la Obtención de Concentración a la Salida.

t operación (min)	t filtración (min)	masa mascarilla (g)	masa total (g)	masa polvo(g)
10	0.22	3.7	4.50	0.80
10	0.22	3.7	4.51	0.81
10	0.22	3.7	4.49	0.79
10	0.22	3.7	4.50	0.80
			Promedio =	**0.80**

Con la masa promedio de polvo colectada en la mascarilla se procede a calcular la concentración a la salida del filtro aplicando la ecuación 5.1 como sigue:

$$C = \frac{(0.8g/10min)}{1.416m^3/min} \Rightarrow \mathbf{C = 0.056\ g/m^3}$$

$$\mathbf{C = 0.024\ gr/pie^3}$$

Aplicando la definición de eficiencia de colección se tiene:

$$\eta = \frac{C_I - C_O}{C_I} * 100 \Rightarrow \eta = \frac{0.8 - 0.056}{0.8} * 100$$

$$\mathbf{\eta = 93\%\ TOTAL}$$

La eficiencia obtenida experimentalmente no iguala a la eficiencia deseada de 99 %; diferentes factores contribuyen a este problema como el difícil control de escape de polvo durante la formación de la nube de polvo, el proceso para formar dicha nube, la formación variante del pastel en el tiempo, etc., pero la más significativa es el utilizar una manga que ya ha sido usada; por consiguiente es evidente el desgaste en la tela y por tanto la perdida de su propiedad en la captación del pastel.

5.3 Calculo de la Caída de Presión Real

Con los resultados experimentales obtenidos se calcula la caída de

presión real que se produce por el efecto solo de la filtración y luego por la combinación de filtración y limpieza. Para el primer caso se aplica la ecuación 3.7 y 5.3 que describe solo el proceso de filtración:

$$\Delta P = [k_e + k_s * W] * V_f \Rightarrow \Delta P = [35 + (4.7 * 8.11 * 0.35 * 30)] * 8.11$$

ΔP = 0.84 plg. H2O

Para el segundo caso se aplica la ecuación 4.5 la cual describe el proceso combinado de filtración y limpieza pulse – jet respetando las unidades americanas por su naturaleza empírica, de tal forma:

$(PE)_{\Delta w} = 6.08\ (8.11)(80)^{-0.65} \Rightarrow (PE)_{\Delta w} = 2.86$

$\Delta P = 2.86 + [4.7 * (8.11)^2 * (0.35 / 7000) * 0.22]$ (1lb = 7000 granos)

ΔP = 2.92 plg. H2O

Comparando este resultado con el obtenido de forma teórica se aprecia que son iguales por tanto los resultados experimentales anteriores definen completamente al filtro diseñado en cuanto a la obtención de la calibración del tiempo de filtración y de limpieza, de las eficiencias de recolección y de colección total, de las constantes en el proceso de filtración y por consiguiente en la ratificación de la potencia real necesaria para el ventilador de succión.

CAPITULO VI

6. ANALISIS DE COSTOS

El costo que involucra el diseño de un filtro de mangas está en función de la cantidad de tela necesaria para el proceso de filtración, es decir , del área neta de filtración; así en dicho costo se involucra la estructura principal, el costo del sistema de limpieza y del sistema de succión. En el caso del filtro pulse – jet su costo se lo estima con la ecuación 6.1 la cual abarca los costos anteriores y describe su precio básico (4).

Precio de Baghouse = 5370+7.6(An) Ec. 6.1

Para el filtro pulse – jet diseñado se tiene un área neta de filtración de 397.2 pie^2 , aplicando la ecuación anterior se estima:

Precio de Baghouse = 5370+7.6(397.2 pie^2)

Precio de Baghouse = $ 8388,72

Se debe añadir el precio total de la tela; como se seleccionó una tela de material polyester de 16 onzas se tiene que su precio es de \$0.75 / pie^2 (apéndice G, tabla 2) por tanto su precio total se calcula como:

Precio de Tela = 397 pie^2 • (\$0.75 / pie^2)

Precio de Tela = \$ 298

Consecuentemente el costo básico total estimado es:

Costo Básico Total = 8388.72 + 298

Costo Básico Total = \$ 8687

Sin embargo, este costo es un valor estimado y básico que debe ser reajustado con los valores reales de las partes constitutivas del filtro; de tal forma:

Costo de Bagbouse = \$600

Costo de Canastilla – Ventury = \$340

Costo de Tela = \$298

Costo ventilador = \$4596

Costo Limpieza Pulse – Jet

- Electroválvula = \$579
- Acoples = \$57
- Tanque Compensador = \$15
- Manguera = \$6.40
- Tubos Inyectores = \$22.40

- Filtro para Humedad = $35.20
- Controlador Timer = $200

Total = $915

Finalmente el costo total se lo obtiene sumando los costos parciales anteriores y aumentando un 10 % por construcción :

Costo Total = 600 + 340 + 298 + 4596 + 915 + 674.9

Costo Total = $ 7424

Logrando un ahorro razonable del 14.5%; cabe destacar que los valores de los precios se indican en la tabla XII.

Tabla XII

Materiales Utilizados y sus Precios

ITEM	MATERIALES	COSTO ($)	TOTAL	COSTO TOTAL ($)
1	Tela Polyester de 16 onz.	$0.75/pie^2	397.2 pie^2	298
2	Conjunto Canastilla - venturi	5	68	340
3	Plancha Porta Mangas			
4	Plancha para Cuerpo Filtro			
5	Plancha para Tolva			
6	Angulo para Estructura	2.28		
7	Tornillos	0.02		
8	Pernos			
9	Silicone	2.64		
10	Seguros	0.7	12	8.4
11	Soldadura (6011)			
12	Cable Eléctrico	0.93		
13	Alambre Eléctrico			
14	Material Eléctrico	3.0		
15	Electroválvula	82.60	7	587.2
16	Filtro de Humedad	35.20	1	35.20

17	Manguera	6.4	1	6.4
18	Tubo para inyección de aire	1.6	7	22.4
19	Tapas para Tubo	0.3	7	2.1
20	Acoples	57		57
21	Tanque Compensador	15	1	15
22	Válvula de Seguridad	3.3	1	3.3
23	Controlador Timer	200	1	200
24	Ventilador	4596	1	4596

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El resultado final del desarrollo de este trabajo es la obtención del diseño de un filtro de mangas con limpieza pulse – jet de las siguientes características:

CARACTERISTICAS DE DISEÑO	RESULTADOS
Velocidad de Filtración	8.11 ft /min
Area Neta de Filtración	397.2 ft^2
Tipo de Tela	Polyester de 16 onzas
Dimensión Manga - Canastilla	ϕ = 4.5 plg.; L = 60 plg.
Area de Cada Manga	5.89 ft^2
Número de Mangas	68
Numero de Válvulas Solenoides	7
Tipo de Válvula	VXF2160 / 2V250-25AC110V
Caída de Presión Total	3 plg. H2O
Potencia del Ventilador	2.5 Hp

2. A través del desarrollo experimental se llega a constatar que la eficiencia de operación del filtro es del 93 % indicando una excelente colección de partículas minerales dentro del mismo que determina por tanto un control adecuado de emisión de partículas hacia la atmósfera.

3. Se tiene además una eficiencia promedio de recolección en la tolva del 69.22 % quien indica una muy buena recuperación de materia prima que puede ser redepositado al proceso; siendo muy atractiva su utilización como parte de este en la industria. En síntesis, el equipo diseñado controla las emisiones de partículas en un 93 % y recupera materia o producto terminado en un 69.22 % con 3 plg de H2O de caída de presión de gasto que determinan un buen funcionamiento y un consumo adecuado de energía reflejado en los 2.5 Hp de potencia del ventilador seleccionado.

4. Considerando las eficiencia obtenidas y el gasto de energía, se recomienda el uso de este tipo de equipo de control durante el proceso de producción como medio de recuperación y control para cualquier tipo de industria productora de polvos como por ejemplo: producción de cemento, de harinas, arenas (canteras), etc. y en otras empresas que no producen polvos pero que generan partículas como las acerías (partículas metálicas), papeleras, etc en las cuales el uso del filtro es recomendado para el control de emisión de dichas partículas.

A P E N D I C E S

APENDICE A

TABLA DE CONVERSIÓN

MAGNITUD	SIST. AMERICANO	SIST. INTERNACIONAL
Longitud	1 pie (pie)	0.3048 m
	1 pulgada (plg)	0.0254 m
Area	1 pie^2	0.0929 m^2
	1 plg^2	$6.454*10^{-4}$ m^2
Volúmen	1 pie^3	0.0283 m^3
	1 galón (gal)	$3.7854*10^{-3}$ m^3
Masa	1 libra (lb)	453.6 gramos (g)
	1 tonelada (ton)	907.18 kg
Presión	1lbf/plg^2 (psi)	6.89 kpa
	1 plg H2O	Pa
Temperatura	1 °F	°C
Potencia	1 caballo (Hp)	746 vatios (W)

OTROS FACTORES DE CONVERSIÓN:

1 μ g = 10^{-6} g

1 lb = 7000 granos (gr)

1 hora = 60 minutos (min) = 3600 segundos (s)

1 min = 60 s

APENDICE B

LEY DE CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y ESTANDAR DE CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

En ejercicio de sus atribuciones legales

Acuerda:

Art. 1.- Aprobar el estatuto constitutivo en virtud del cual adquiere personería jurídica la fundación NUESTRA Núcleo de Estudios y Trabajo en Salud, con sede en Quito.

Art. 2.- Ordenar su publicación en el Registro Oficial.

Comuníquese, en Quito, a 4 de junio de 1991.

f.) Dr. Plutarco Naranjo Vargas, Ministro de Salud Pública.

Es fiel copia del original,- Certifico:

f.) Lic. José Ibarra Munizaga, Secretario General del Ministerio de Salud pública.

Nº 11338—A

EL MINISTERIO DE SALUD PUBLICA

Considerando:

Que la Ley para la prevención y Control de la Contaminación Ambiental, que fue expedida mediante Decreto Supremo 374 del 21 de mayo de 1976 en su capítulo II, Artículo 6 Literal C, establece que corresponde al Comité Interinstitucional de la Protección del Ambiente: "Expedir mediante acuerdo, las normas técnicas y regulaciones a base de los proyectos preparados por los organismos pertinentes".

Que en el capítulo V Artículo 11 de esta Ley manifiesta:

"Queda prohibido expeler a la atmósfera o descargar en ella sin sujetarse a las correspondientes mormas técnicas y regulaciones, contaminantes que a juicio del Ministerio de Salud, puedan perjudicar la Salud y la vida humana, la flora, la fauna y los recursos o bienes del estado o de particulares o constituir una molestia.

Que el aire tiene diversos usos entre ellos el de la respiración por los seres vivos, siendo éste tan importante y prioritario que hace indispensable establecer la calidad mínima de una atmósfera tolerable.

Que las investigaciones realizadas por el Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias (IEOS), sobre la calidad del aire en varias ciudades del país nos indican que la contaminación atmosférica está alcanzando niveles que implican riesgos para la salud pública.

Que es necesario reglamentar la prevención y control de la contaminación ambiental en lo relativo al recurso aire.

Acuerda:

EXPEDIR EL REGLAMENTO QUE ESTABLECE LAS NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE Y SUS METODOS DE MEDICION.

CAPITULO I

DEFINICIONES GENERALES

Art. 1 ATMOSFERA.- Entiéndase por atmósfera el fluído gaseoso que envuelve el globo terráqueo.

Art. 2 DEFINICION DE AIRE.- Entiéndase por aire una mezcla gaseosa cuya composición normal es por lo menos veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y siete por ciento (77%) de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua, en reacción volumétrica.

Art. 3 CONTAMINACION DE AIRE.- Entiéndase por contaminación del aire la presencia o acción de los contaminantes en condiciones tales de duración, concentración o intensidad, que afecten desfavorablemente la vida y la salud humana, animal o vegetal: los bienes materiales del hombre o de la comunidad o interfieran su bienestar.

Art. 4 CONTAMINACION NATURAL DEL AIRE.- Entiéndase por contaminación natural de aire aquella originada en una fuente natural o, sin mediación de la actividad humana.

Art.5 CONTAMINACION ARTIFICIAL DEL AIRE.- Entiéndase por contaminación artificial del aire aquella originada o producida en una fuente natural o artificial con mediación de la actividad humana.

Art.6 CONCENTRACION DE UNA SUBSTANCIA EN EL AIRE.- Entiéndase por concentración de una substancia en el aire, la la relación que existe entre el peso o el volumen de la substancia y la unidad de volumen del aire en el cual esté contenida.

Art.7 CONDICIONES DE REFERENCIA.- Entiéndase por condiciones de referencia las correspondientes a veinte y cinco grados centígrados (25C) y setecientos sesenta milímetros de mercurio (760 mm Hg).

Art.8 FUENTE MOVIL DE CONTAMINACION DEL AIRE.- Denomínase fuente móvil de contaminación del aire aquella que habilitada para desplazarse pueda generar o emitir contaminantes.

Art.9 FUENTE FIJA DE CONTAMINACION DEL AIRE.- Denomínase fuente fija de contaminación del aire aquella que emite o es suceptible de producir contaminación del aire, en un lugar fijo o inamovible.

Art.10 FUENTE FIJA NATURAL DE CONTAMINACION DEL AIRE.- Denomínase fuente fija natural de contaminación del aire todo hecho, formación o fenómeno, que emite o es susceptible de emitir contaminantes del sire sin mediación de la actividad humana.

Art.11 FUENTE FIJA ARTIFICIAL DE CONTAMINACION DEL AIRE.- Denomínase fuente fija artificial de contaminación del aire todo proceso u operación realizada por actividad humana o con su participación susceptible de emitir contaminantes.

Art.12 DESCARGA.- Entiéndase por descarga la salida a la atmófera de contaminantes del aire.

Art.13 EMISION CONTAMINANTE.- Entiéndase por emisión contaminante la descarga proveniente de una fuente fija natural o artificial de contaminación del aire, a través de un ducto o chimenea, o en forma dispersa.

Art.14 PROMEDIO GEOMETRICO.- Entiéndase por promedio geométrico la raíz enésima del producto de todos los resultados a promediar, para determinarlo se aplica la siguiente ecuación.

G = X1 X2 X3 .....Xn

G = promedio geométrico
X1,X2,Xn = todos los resultados a promediar
n = número de muestras.

CAPITULO II

NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE Y SUS METODOS DE MEDICION

Art.15. Para el control de la calidad del aire se tendrán en cuenta las normas de calidad señaladas en el presente artículo:

a) PARTICULAS SEDIMENTABLES

La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante treita (30) días, es de (1) miligramo por centímetro cuadrado:

(1 mg/cm2 x 30 d)

b) PARTICULAS TOTALES EN SUSPENSION

El promedio geométrico de los resultados de todas las muestras diarias recolectadas en forma continua durante veinte y cuatro (24) horas, en un intervalo de doce (12) meses, no deberá exceder de ochenta (80) microgramos por metro cúbico (80 ug/m3).

La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante veinte y cuatro (24) horas que se puede sobrepasar por una sola vez en un período de doce (12) meses, es de doscientos cincuenta (250) microgramos por metro cúbico (250 ug/m3).

c) DIOXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El promedio aritmético de los resultados de todas las muestras diarias recolectadas en forma continua durante veinte y cuatro (24) horas en un intervalo de doce (12) meses, no deberá exceder de ochenta (80) microgramos por metro cúbico (80 $\mu g/m^3$).

La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 24 horas que se puede sobrepasar, por una sola vez en un período de 12 meses, es de cuatrocientos microgramos por metro cúbico (400 $\mu g/m^3$).

La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 3 horas que se puede sobrepasar, por una sola vez en un período de 12 meses, es de mil quinientos (1500) microgramos por metro cúbico (1500 $\mu g/m^3$).

d) MONOXIDO DE CARBONO (CO)

La máxima concentración de una muestra recolectada en forma contínua durante 8 horas

(como promedio aritmético móvil) es de diez miligramos por metro cúbico (10 mg/m^3).

La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 1 hora es de cuarenta miligramos por metro cúbico (40 mg/m^3).

e) OXIDANTES FOTOQUIMICOS EXPRESADOS COMO OZONO (O_3)

La máxima concentración de una muestra tomada en forma continua durante 1 hora que se puede sobrepasar, por una sola vez en un período de 12 meses, es de doscientos (200) microgramos por metro cúbico (200 $\mu g/m^3$).

f) OXIDOS DE NITROGENO

Medidos como dióxido de Nitrógeno NO_2)
El promedio aritmético de los resultados de las muestras diarias recolectadas en forma continua durante veinte y cuatro (24) horas, en un intervalo de 12 meses, no deberá exceder los cien (100) microgramos por metro cúbico (100 $\mu g/m^3$).

g) PLOMO

El promedio aritmético de los resultados de las muestras diarias recolectadas en forma continua durante veinte y cuatro (24) horas, en un intervalo de 3 meses, no deberá exceder los uno y medio (1,5) microgramos por metro cúbico (1,5 $\mu g/m^3$).

Las normas sobre calidad de aire señaladas en éste artículo, representan concentraciones medidas teniendo en cuenta como condiciones de referencia: 25 ° C y 760 mm de mercurio.

Art. 16: Las mediciones observadas sobre la calidad del aire deberán corregirse de acuerdo a las condiciones de la localidad, en la cual se efectúa la medición utilizando la siguiente ecuación:

$$MC = MO \times \frac{760 \text{ mm Hg}}{Pb \text{ mmHg}} \times \frac{(273° + t\,°C)°K}{296°K}$$

En donde:

MC = medición corregida
MO = medición observada
Pb = Pres. barométrica local mm de mercurio
t°C = temperatura local, en grados centígrados.

Art. 17: Para la comprobación de la calidad del aire en un sitio, los contaminantes mencionados en el artículo 15 deberán ser determinados utilizando los siguientes métodos y frecuencia:

CONTAMINANTE	METODO DE ANALISIS	FRECUENCIA MINIMA DE MUESTREO
Partículas sedimentables	Gravimétrico	Una muestra tomada en forma contínua durante 30 días.
Partículas totales en suspensión	Gravimétrico utilizando un muestreador de alto volumen	Una muestra tomada en forma contínua 24 horas, cada 3 días
Dióxido de Azufre	Colorimétrico, utilizando la paranosanilina	Una muestra tomada en forma contínua durante 24 horas, cada 3 días
Monóxido de Carbono	Analizador infrarrojo no dispersivo	Una muestra tomada en forma contínua en períodos de 8 horas
Oxidantes fotoquímicos (como O_3)	Quimi luminiscencia fotómetro Ultra violeta	Una muestra diaria tomada en forma contínua de 06h00 a 18h00
Oxidos de Nitrógeno (como NO_2)	Hochheiser, Quimi luminiscencia	Una muestra tomada en forma contínua durante 24 horas, cada 3 días
Plomo	Absorción Atómica	Una muestra tomada en forma contínua 24 horas, cada 3 días

NOTA: Podrá utilizarse cualquier otro método que de resultados equivalentes, debiendo ser previamente homologado y autorizado por el Ministerio de Salud Pública.

CAPITULO III
DISPOSICIONES GENERALES

Art. 18 El Ministerio de Salud como resultado de las acciones de vigilancia y control o de investigaciones de orden científico o cuando las circunstancias lo justifiquen podrá agregar, completar o modificar la lista de contaminantes, así como las concentraciones, métodos de análisis y los períodos señalados en el artículo 17.

Art. 19 A fin de que se cumplan las normas sobre calidad de aire, el Ministerio de salud podrá regular por límites de permisibilidad de la emisión de contaminantes mediante la promulgación de normas de emisión, las mismas que serán de cumplimiento obligatorio de todos los emisores efectivos o potenciales.

Art. 20 Quien infrinja las normas correspondientes quedará sujeto a lo que estipula el artículo 26 de la Ley para la Prevención y control de la Contaminación Ambiental.

Art. 21 Encárgase la ejecución de este reglamento que entrará en va los organismos ejecutivos que contempal el Capítulo IV, art. 10 de la Ley para la Prevención y control de la Contaminación Ambiental.

Dado en Quito, a los cinco días del mes de junio de mil novecientos noventa y uno.

f.) Dr. Plutarco Naranjo Vargas, Ministro de Salud Pública, Presidente del Comité Insterinstitucional de la Protección del Ambiente.

f.) Lcdo. José Ibarru Munizaga. Secretario General del Ministerio de Salud Pública.

APENDICE C

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS TOTALES EN SUSPENSION EN EL AIRE USANDO EL METODO GRAVIMÉTRICO.

CONSIDERANDO

Que el Reglamento que establece las Normas de calidad del aire y sus Métodos de medición fue expedido 15 de julio de 1991, Registro Oficial No. 726, por lo cual es indispensable definir los procedimientos para determinar las concentraciones de los parámetros a medirse, según los métodos de análisis establecidos.

ACUERDA

Expedir la Norma Técnica que establece el procedimiento para determinar la concentración de partículas totales en suspensión (P.T.S.) en el aire por el Método Gravimétrico para el muestreo de alto volumen.

CAPITULO I

DEFINICIONES GENERALES

Artículo 1. Para los efectos de esta norma técnica se consideran las definiciones contenidas en el Reglamento que establece las Normas de calidad del aire y sus métodos de medición, publicadas en el Registro Oficial No. 726 del 15 de julio de 1991, y las siguientes:

Condiciones de referencia - Temperatura y presión barométrica, a las cuales se deberán corregir los resultados de los muestreos y análisis de un contaminante en el aire. Estas condiciones son: temperatura veinticinco grados centígrados (25°C)y presión barométrica setecientos sesenta milímetros de mercurio (760 mm Hg).

Método de referencia - Procedimiento de análisis y medición descrito en una norma técnica, que debe aplicarse para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente y que sirve también, en su caso , para contrastar el método equivalente, cuando éste se haya establecido.

Método equivalente - Procedimiento de análisis y medición para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente, señalado como tal en una norma técnica por producir resultados similares a los que se obtienen con el método de referencia, y ser susceptibles de aplicarse en sustitución de éste.

Partículas Totales en Suspensión - Cualquier partícula

CONSIDERANDO

Que el Reglamento que establece las Normas de calidad del aire y sus Métodos de medición fue expedido 15 de julio de 1991, Registro Oficial No. 726, por lo cual es indispensable definir los procedimientos para determinar las concentraciones de los parámetros a medirse, según los métodos de análisis establecidos.

ACUERDA

Expedir la Norma técnica que establece el procedimiento para determinar la concentración de partículas totales en suspensión (P.T.S.) en el aire por el Método Gravimétrico para el muestreo de alto volumen.

CAPITULO I

DEFINICIONES GENERALES

Artículo 1. Para los efectos de esta norma técnica se consideran las definiciones contenidas en el Reglamento que establece las Normas de calidad del aire y sus métodos de medición, publicadas en el Registro Oficial No. 726 del 15 de julio de 1991, y las siguientes:

Condiciones de referencia - Temperatura y presión barométrica, a las cuales se deberán corregir los resultados de los muestreos y análisis de un contaminante en el aire. Estas condiciones son: temperatura veinticinco grados centígrados (25°C)y presión barométrica setecientos sesenta milímetros de mercurio (760 mm Hg).

Método de referencia - Procedimiento de análisis y medición descrito en una norma técnica, que debe aplicarse para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente y que sirve también, en su caso , para contrastar el método equivalente, cuando éste se haya establecido.

Método equivalente - Procedimiento de análisis y medición para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente, señalado como tal en una norma técnica por producir resultados similares a los que se obtienen con el método de referencia, y ser susceptibles de aplicarse en sustitución de éste.

Partículas Totales en Suspensión - Cualquier partícula

sólida o liquida dispersa en la atmósfera, con diámetro aerodinámico hasta 100(cien) µm, como polvo, cenizas, hollín, partículas de diversos metales, cemento, polen y niebla, entre otros.

Artículo 2. Para los efectos de esta norma técnica, se considerarán las siguientes unidades de medida y abreviaturas:

°C – Grado centígrado;
K – Kelvin;
mm Hg – Milímetro de mercurio;
µm – Micrometro;
m^3/min – Metros cúbicos por (sobre) minuto;
cm – Centímetro;
cm^2 – Centímetros cuadrados;
µg/m^3 ref. – Microgramos sobre metro cúbico corregido a las condiciones de referencia;

CAPITULO II

PROCEDIMIENTOS

Artículo 3. **Método gravimétrico de comparación para muestras de gran volumen.**

El método de referencia para determinar la concentración de partículas totales en suspensión en el aire será el de muestreo de alto volumen. En este método, un muestreador de aire, adecuadamente localizado, succiona a través de un filtro, una cantidad medida de aire hacia el interior de una caseta o coraza de protección, durante un periodo nominal de muestreo de 24 horas. El flujo de aire y la geometría del muestreador serán tales, que favorezcan la recolección de partículas en suspensión de diámetro aerodinámico comprendido entre 0.1(0.3) y 100 µm, (revisar propuestas) dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados deberán tener una eficiencia de recolección mínima del 99 por ciento para partículas de 0.3 µm.

El filtro será pesado, equilibrándolo en humedad y temperatura ambiente, antes y después de su uso, para determinar su ganancia neta de peso (masa).

El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia, expresado en m^3, se determina a partir del flujo de aire medido en unidades de 0.01 m^3/min y del tiempo de muestreo en minutos (min).

La concentración de partículas totales en suspensión en el aire se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas sobre el volumen de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cubico. corregido a las condiciones de referencia.

Artículo 4. Instrumental

El equipo necesario para realizar el monitoreo de P.T.S. en el aire es el referido en la figura No. 1

Este equipo muestreador consta de una bomba de vacío: soporte para la sujeción del filtro: un registrador de flujo de aire: un regulador de flujo: medidor (controlador) de tiempo transcurrido: un cronómetro para programar el tiempo de muestreo y de preferencia un dispositivo de voltaje variable para compensar las variaciones causadas por las caídas de presión en el filtro y por el voltaje en la línea de alimentación.

El motor de la bomba de vacío deberá contar con una capacidad de operación de 24 horas continuas y producir un flujo mínimo de aire de 1.1 m^3/min (1.13). con un filtro cargado, y máximo de 1.7 m^3/min con un filtro limpio.

El conjunto deberá hallarse cubierto con una coraza de protección (techo), como se muestra en la figura No. 1, para proteger el filtro de lluvia y de sedimentación de otros materiales que puedan caer sobre el filtro. El colector de polvo debe ir montado en la caseta verticalmente para que el filtro se mantiene en posición horizontal. La descarga de aire deberá ocurrir, al menos, a 40 cm de distancia de la entrada de aire; en dicha entrada se controlará que la velocidad del aire sea de entre 20 y 35 cm/seg.

El muestreo se lleva a cabo de la siguiente forma: el aire muestreado entra a la coraza bajo los huecos de la cubierta, se succiona a través del filtro y finalmente es devuelto a la atmósfera.

El filtro será de fibra de vidrio , con un poder de retención del 99 %, como mínimo para las partículas de 0.3 µm de diámetro y/o otro material inerte no hidroscópico, y no debe tener grietas, perforaciones u otras imperfecciones. Con un tamaño nominal de 20.3 ± 0.2 por 25.4 ± 0.2 cm, con una área expuesta de 406.5 cm^2, una caída de presión de 42 a 54 mm Hg a un flujo de 1.5 m^3/min a través del área expuesta nominal, un pH de 6 a 10.

El muestreador deberá incorporar un registrador de flujo, capaz de indicar el flujo total de aire a través del

filtro, con una precisión de ± 0.02 m^3/min, en el intervalo de 1.0 a 1.8 m^3/min. El registrador debe estar graduado para medir presiones comprendidas entre 0 y 25 cm de columna de agua y para inscribirlas en un diagrama circular, dividido en 24 (veinte cuatro) intervalos de 1 (una) hora.

El dispositivo del regulador de flujo debe permitir la regulación del flujo de aire admitido al colector con una precisión de ± 0.028 m^3/min, independientemente de las variaciones de la carga del filtro, del voltaje de tendido eléctrico, de la temperatura y de la presión.

El muestreador deberá incorporar un medidor(controlador) de tiempo transcurrido, para controlar el tiempo de encendido y apagado del equipo que conforma el muestreador, incluyendo el motor, con una capacidad mínima de 24 ± 1 hora y con una precisión de al menos ± 15 minutos.

Para programar el tiempo de muestreo, el equipo contará con un cronómetro, permitiendo fijar el tiempo de encendido y de apagado del motor de la bomba de vacío para realización del muestreo por el período del tiempo programado.

Instrumental adicional:

- Dispositivo de calibrado de orificio (equipo de calibración);
- Monómetro diferencial:
- Barómetro;
- Cámara de acondicionamiento de filtro;
- Balanza analitica;
- Marcador para identificar los filtros.

Artículo 5. Procedimiento de toma de muestras

El procedimiento para realizar el muestreo será el siguiente:

Levantar la tapa de la cubierta protectora e instalar el filtro, cerrar la tapa y poner a operar el muestreador durante unos cinco minutos para establecer las condiciones de operación; registrar la lectura del registrador de flujo de aire, si ésta se halla fuera del intervalo aceptable: entre 1.1 y 1.7 m^3/min puede cambiarse de filtro, si aun así el flujo no se encuentra todavía dentro de los limites indicados, puede ajustarse la tasa de flujo del muestreador por medio del regulador de flujo, cuidando no afectar a la calibración. En caso necesario, detener el muestreador y efectuar una nueva calibración.

Antes de usar, los filtros deberán ser revisados visualmente (cámara de luz), debiendo presentar una estructura uniforme. Los que pasan la prueba se folliarán (marcarán) y acondicionarán durante 24 horas en un lugar con temperatura controlada de 25 ± 2 °C y una humedad relativa constante del 50 ± 5 % de variación (cámara de acondicionamiento de filtro). Después de su acondicionamiento se pesan los filtros, obteniendo el peso inicial (Pi), expresado en gramos con la precisión de milésimas, el cual se registra.

Registrar el numero del filtro instalado, su localización, así como la fecha y hora de arranque en el Formulario No. 4 (Red Ecuaire), fig. 5; ajustar el cronómetro para que el muestreador funcione durante 24 horas, iniciando su operación a la media noche, preferiblemente: registrar la numeración del medidor (controlador) de tiempo transcurrido.

Después de ser transcurridas las 24 horas de muestreo, quitar el filtro con cuidado, tocándolo únicamente por los extremos; guardar el filtro en un portafiltro (o sobre de papel manila); retirar la carta de flujo y guardar (o poner en el mismo sobre), indicando la fecha del muestreo.

Completar la información solicitada en el Formulario No. 4, fig. 5: el nombre de la estación, hora, tiempo de muestreo indicado por el medidor de tiempo transcurrido, tipo de filtro utilizado, numero de muestreador y del motor, nombre de la persona responsable de la operación, incluyendo anotaciones sobre cualquier actividad no usual cercana al sitio de muestreo y que pudiera contribuir a modificar el nivel de concentración de partículas totales en suspensión.

Los filtros así muestreados deberán llevarse al laboratorio y nuevamente ser acondicionados durante 24 horas, a la misma temperatura y humedad iniciales, y se procederá a pesarlos, obteniendo el peso final (Pf), expresado en gramos, el cual también se registra. Si es necesario, los filtros se guardan después de pesados, para efectuar los análisis químicos.

Para una adecuada conservación del muestreador de alto volumen, las escobillas (carbones del motor) deben cambiarse oportunamente (aproximadamente a las 600-700 horas de operación).

Artículo 6. **Procedimiento de análisis**

Para proceder al análisis gravimétrico, cual permitirá reportar los valores de concentración de partículas en suspensión, se calculará el flujo promedio en el

muestreador (Q), y utilizando la expresión de calibración se calculará el flujo promedio de referencia del muestreo (Qref). El volumen total de aire se calculará:

$$Vref = Qref * t$$

donde:

Vref - Volumen total de aire muestreado en unidades de referencia (m^3 ref);

Qref - Flujo promedio en condiciones de referencia del muestreo (m^3 ref/min);

t - Tiempo de muestreo en minutos (min);

Para calcular la concentración de partículas totales en suspensión se aplicará la siguiente fórmula:

$$C = (Pf - Pi) * 10^6 / Vref$$

siendo:

C - Concentración de masa de las partículas totales en suspensión, expresada en $\mu g/m^3$;

Pf - Peso final del filtro, en gramos (g);

Pi - Peso inicial del filtro, en gramos (g);

Vref - Volumen total de aire muestreado, en unidades de referencia (m^3 ref);

(10^6) - factor de conversión de gramos (g) a microgramos (μg);

Artículo 7. Para expresar las concentraciones de partículas suspendidas en condiciones de referencia, es necesario corregir el volumen medido y adecuarlo a dichas condiciones. Si es necesario, la presión barométrica ambiente no corregida y la temperatura pueden ser obtenidas de una estación meteorológica o aeropuerto cercano. No es fundamental hacer estas mediciones si el indicador de flujo del muestreador no requiere correcciones de presión o temperatura, o si las condiciones promedio del lugar donde se encuentra el muestreador, para la estación del año en que se realiza la muestra, están incorporadas en la calibración del muestreador. Para muestreadores que tienen registradores de

flujo, pero no controladores de flujo constante, la temperatura y presión promedio en el sitio, durante el período de muestreo, deberán ser estimadas de datos de la estación meteorológica o aeropuerto más cercano.

Artículo 8. Procedimiento de calibración

Todo equipo de muestreo de alto volumen a que se refiere esta norma técnica requiere de una calibración, la cual se llevará a cabo con el equipo y procedimiento que a continuación se describe:

KIT (conjunto) de calibración:

- Placa adaptadora (opcional según el equipo) y juntas de hule;
- Cinco placas de resistencia normalizadas, numeros 18, 13, 10, 7 y 5, o unidad de orificio con resistencia variable;
- Unidad de orificio;
- Monómetro de tubo en "U" con agua como liquido manométrico, con escala de 0-10 pulgadas (0-25.4 centimetros);
- Hojas de registro de datos;
- Curva de calibración correspondiente a la unidad de orificio que se esté utilizando;

En las fig. 2, 3, 4, se muestra la forma de colocarlo el equipo de calibración en el muestreador de alto volumen, una curva típica de calibración correspondiente a una unidad de orificio y la hoja de registro que deberá utilizarse.

El procedimiento de calibración de un equipo de muestreo de alto volumen, mediante el empleo de una unidad de orificio, es el siguiente:

Anotar en la hoja de registro, fig. 4 la presión atmosférica (Pi) y la temperatura (Ti) proporcionados por el fabricante de la unidad de orificio, y que aparecen, por lo general, junto con la curva de calibración del orificio como se indica en la figura 3; anotar la presión atmosférica (Pa) y la temperatura ambiente (Ta) al momento en que se esté calibrando el muestreador de alto volumen. Se deben utilizar mm Hg para la presión atmosférica y °C para la temperatura ambiente. Si no se tiene el barómetro, solicitar al aeropuerto o estación meteorológica más cercana el dato de presión atmosférica correspondiente.

Instalar una carta limpia en el registrador de flujo del muestreador y cerciorarse de que el trazador de dicho

registrador está en cero cuando el motor del muestreador está apagado. Si no está en cero, ajustarlo a cero siguiendo las instrucciones del fabricante; usualmente, haciendo girar con un desarmador el tornillo localizado sobre la esquina inferior derecha de la carátula del registrador.

Colocar la placa de resistencia No. 18 en la unidad de orificio y si el muestreador está equipado con dispositivo de flujo variable, utilizar la placa adaptadora para conectar la unidad de orificio al portafiltro del muestreador de alto volumen. Si no se dispone de una placa adaptadora, conectar la unidad de orificio directamente al motor, quitando el portafiltro. Apretar firmemente todas las conexiones de aire y verificar que no haya fugas.

Poner a funcionar el motor del muestreador durante cinco minutos para estabilizarlo, conectando el motor directamente a una fuente estable de energía.

En la hoja de registro que aparece en la figura 4, anotar en la columna " Total H_2O", la lectura del manómetro de agua de la unidad de orificio y en la columna J, la lectura del flujo del registrador de carta del muestreador de alto volumen.

Repetir los pasos anteriores para las placas de resistencia No: 13, 10, 7 y 5. Existen unidades de orificio con resistencias variables que no requieren de cambios de placas, en este caso, habrá que tomar al menos cinco lecturas uniformemente distribuidas en el intervalo de 1.1 a 1.8 m^3/min. En cado caso, anotar las lecturas del registrador del muestreador en la columna J de la hoja de registro indicada en la figura 4.

Las lecturas del manómetro de las placas orificio "Total H_2O" necesitan ser corregidas a flujos de condiciones de referencia, usando las siguiente ecuación:

$$Qref = 1/m \times [(\Delta H_2O(Pa/760) \times (298/Ta))^{0.5} - b]$$

Qref - Flujo de referencia calculado segun el orificio calibrador, m3/min:

ΔH2O - Lectura del manómetro durante la calibración;

Ta - Temperatura del sitio de muestreo en K (Temperatura en °C + 273):

298 - Temperatura de referencia en K (25 °C + 273°=298 K);

Pa - Presión barometrica ambiente del sitio de

muestreo en mm Hg:

760 - Presión barométrica de referencia en mm Hg;

m - Pendiente del orificio calibrador;

b - Intersección del orificio calibrador;

^ - Elevado a la potencia

Cuando los flujos de referencia han sido determinados para los cinco puntos, estos son registrados en la columna de Qref, en m3/min, figura 4.

Las lecturas del registrador tomadas durante la calibración, se corrigen a las condiciones meteorológicas de referencia, usando:

$$JC = J((Pa/760) \times (298/Ta))^{0.5}$$

JC - Lectura del registrador corregida a las condiciones de referencia;

J - Lectura del registrador obtenida durante la calibración;

Las lecturas corregidas del registrador se anotan en la columna JC, figura 4.

Usando Qref. y JC como X y Y respectivamente, se realiza regresión lineal y se obtiene la pendiente (m`), intersección (b`) y el coeficiente de la correlación (r`), que no debe ser menor a 0.990, después de la calibración de 5 (cinco) puntos.

Un coeficiente menor a 0.990, indica una calibración no lineal, y procedimiento de la calibración debe ser realizado de nuevo (esto puede ocurrir cuando hay fugas de aire).

Articulo 9. El calculo del flujo de aire de operación, corregido a las condiciones de referencia se realice utilizando la siguiente fórmula:

$$Qref = 1/m` \times [JC - b]$$

JC - Lectura del registrador corregida a las condiciones de referencia;

m` - Pendiente de la recta de correlación obtenida durante calibración;

b` - Intersección de las coordenadas obtenida durante calibración del muestreador.

m` y b` pueden ser obtenidos trazando los puntos en papel milimétrico y ajustándolo a una recta o por el método de mínimos cuadrados.

Artículo 10. Mirando la columna de Qref, los flujos que están en el rango de operación de 1.1 a 1.7 m3/min (39 a 60 pie ^3 /min). pueden ser identificados con la lectura de cartilla que asegura que muestreador está operando dentro del rango aceptable del flujo de operación.

CAPITULO III

DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 11. El método descrito en el artículo 3ro es el método de referencia para efectuar la determinación de la concentración de partículas totales en suspensión en el aire, sin que existan métodos equivalentes.

Artículo 12. Esta norma técnica es de orden público e interés social, así como de observancia obligatoria por las autoridades gubernamentales (estatales), provinciales y municipales, que tengan a su cargo el establecimiento (redes de monitoreo) y operación de sistemas manuales de monitoreo de la calidad del aire. en los que se determinen concentraciones de partículas totales en suspensión.

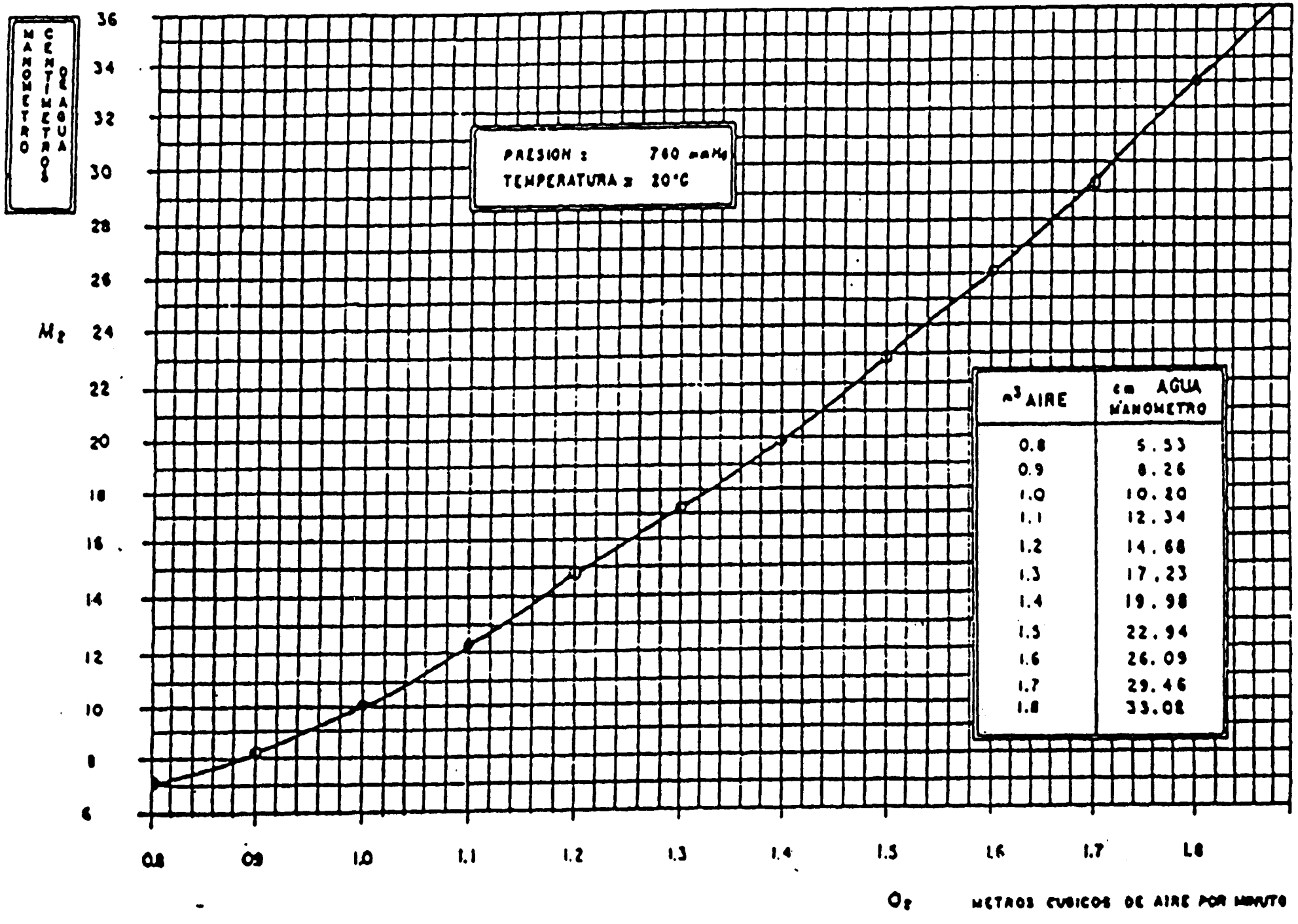
Artículo 13. Para los efectos de esta norma. se considerarán ?...

Artículo 14. La presente Norma Técnica entrará en vigencia desde la fecha de su publicación (promulgación) en el Registro Oficial.

Dado en Quito 1996

FIGURA 3

CURVA PROMEDIO DE VALORES PARA ORIFICIO DE CALIBRACION
G M W - 25 A



m^3 AIRE	cm AGUA MANOMETRO
0.8	5.53
0.9	8.26
1.0	10.80
1.1	12.34
1.2	14.68
1.3	17.23
1.4	19.98
1.5	22.94
1.6	26.09
1.7	29.46
1.8	33.02

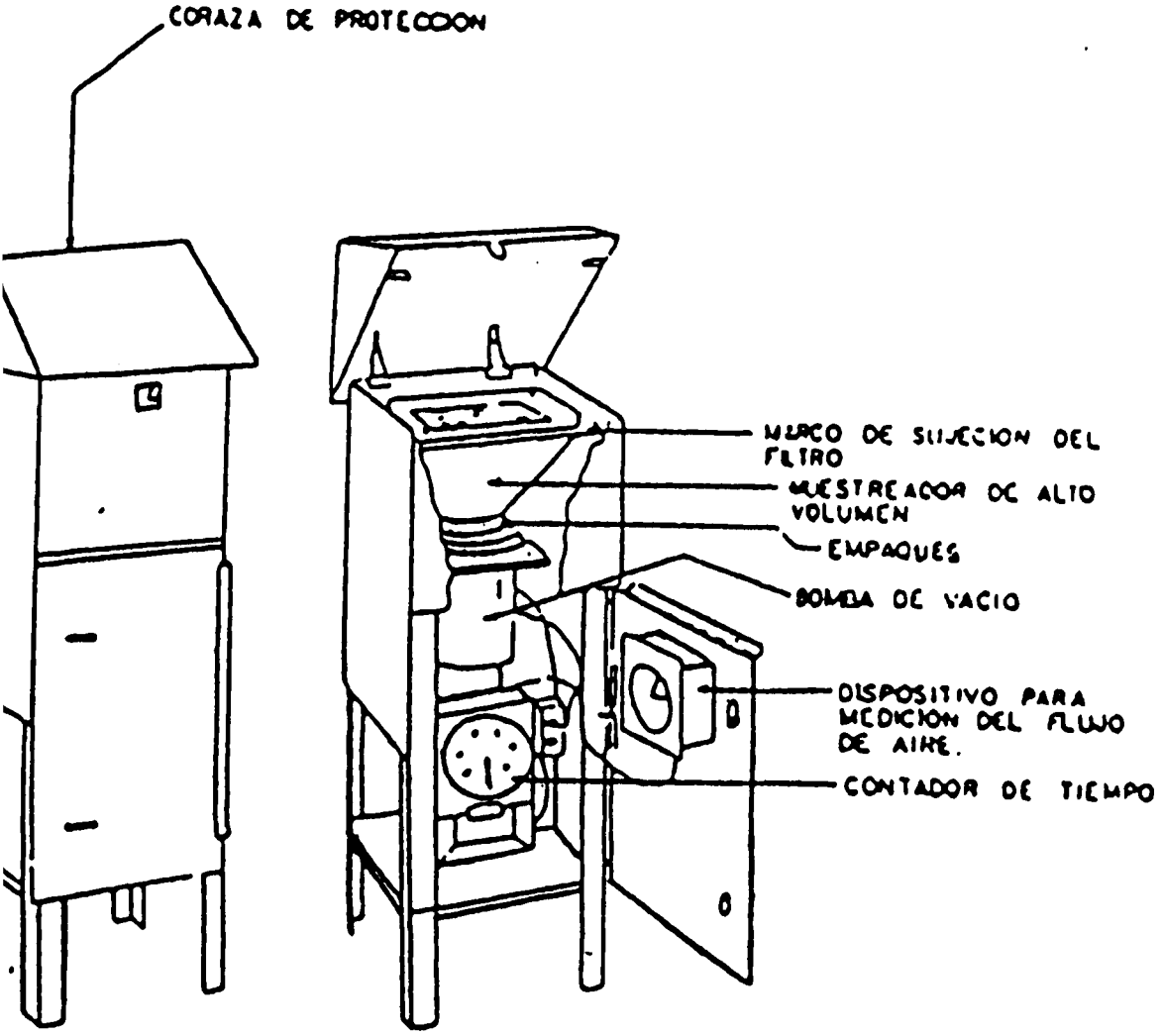


FIGURA 1

Equipo para el muestreo de particulas suspendidas.

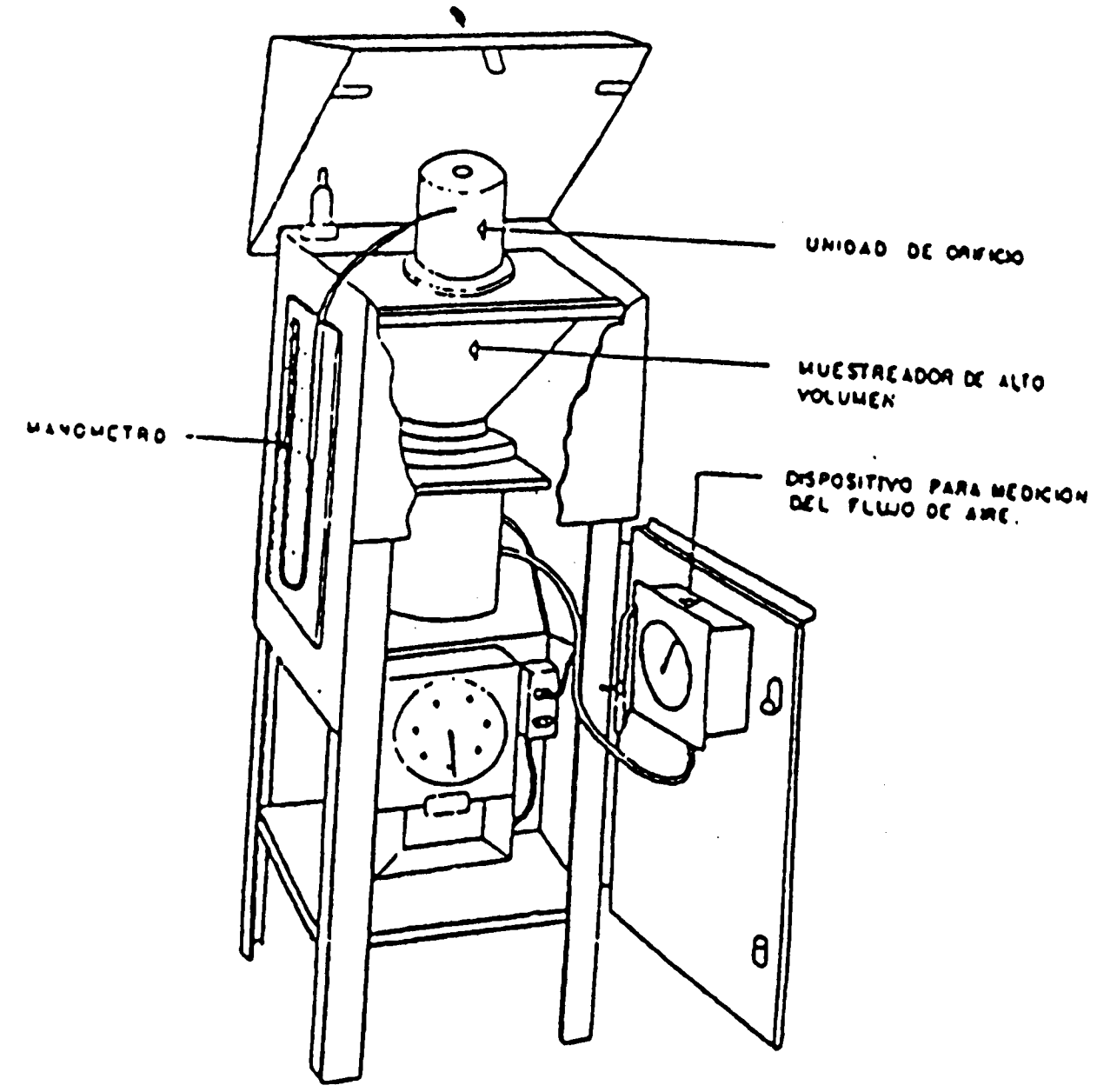


FIGURA 2

Arreglo del dispositivo para la calibración del flujo del aire.

APENDICE D

PROCESO DE PRODUCCION DEL CEMENTO

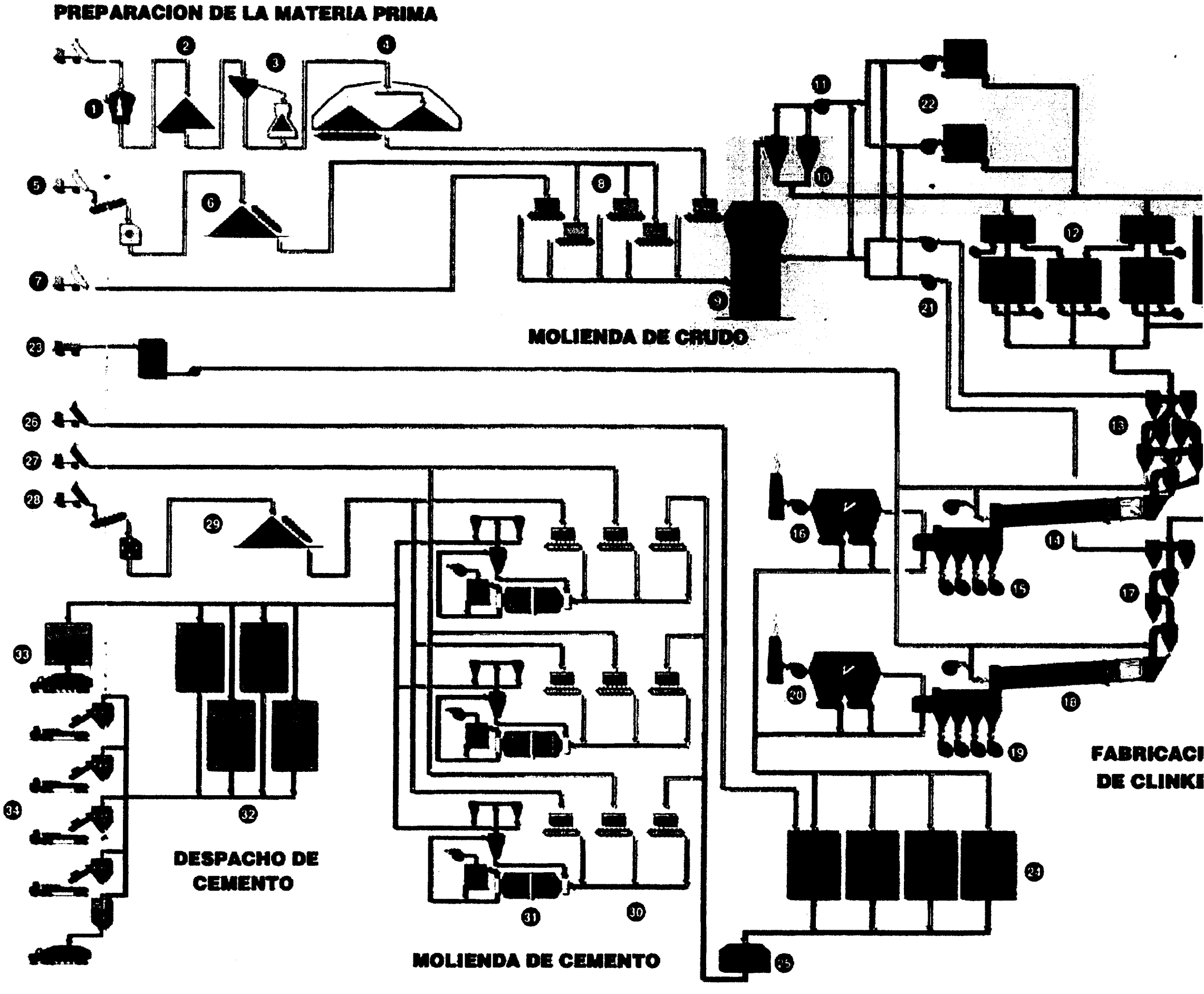
El proceso de la fabricación del cemento se realiza básicamente en las siguientes etapas:

Molienda de crudo: es la mezcla y pulverización de las materias primas básicas (piedra caliza, arcilla y arena ferrosa).

Fabricación del Clinker: es la sintetización o cocción del crudo en los hornos rotatorios.

Molienda de cemento: es la mezcla y pulverización del clinker y yeso para producir el cemento.

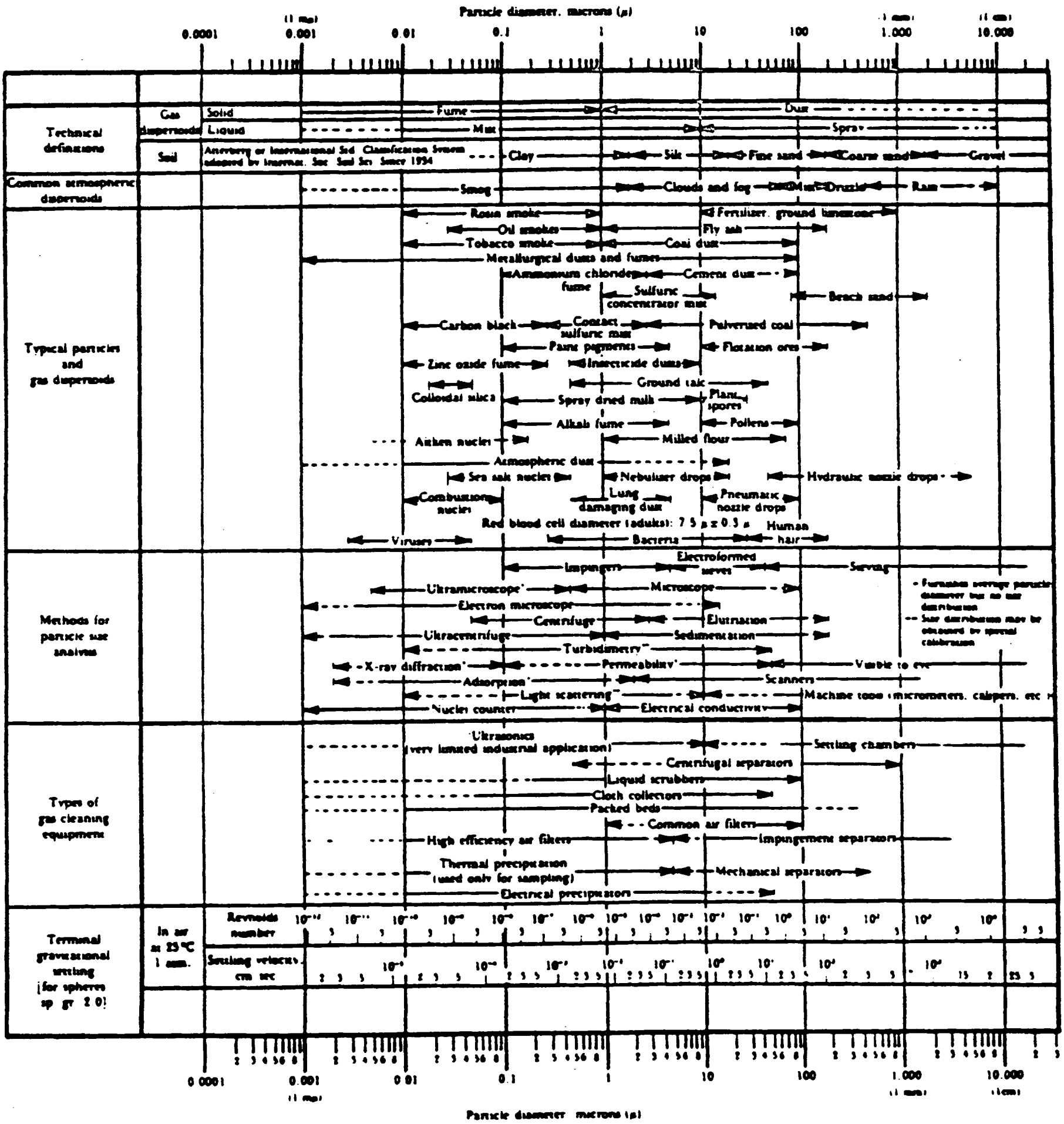
1. Trituradora Primaria para piedra caliza
2. Pila Intermedia
3. Trituradora Secundaria y Zaranda
4. Prehomogenización Circular de caliza
5. Recepción y trituración de arcilla
6. Prehomogenización longitudinal de arcilla
7. Recepción de arena ferrosa
8. Tolvas de alimentación del molino de crudo
9. Molino vertical de crudo
10. Ciclones del molino vertical
11. Ventilador del molino vertical
12. Silos de homogenización y almacenamiento de crudo
13. Precalentador horno 1
14. Horno 1
15. Enfriadora de clinker 1
16. Filtro Electrostático horno 1
17. Precalentador horno 2
18. Horno 2
19. Enfriadora de clinker 2
20. Filtro Electrostático horno 2
21. Ventiladores de tiro inducido
22. Ventiladores y filtros de mangas
23. Recepción y almacenamiento de petróleo
24. Silos de clinker
25. Prensa de Clinker
26. Recepción de Clinker
27. Stand-by para clinker y yeso
28. Recepción y trituración de yeso
29. Prehomogenización longitudinal de yeso
30. Tolvas de alimentación a molinos de cemento
31. Molinos Tubolares para cemento
32. Silos de almacenamiento para cemento
33. Despacho de cemento a granel
34. Despacho de cemento en sacos



APENDICE E

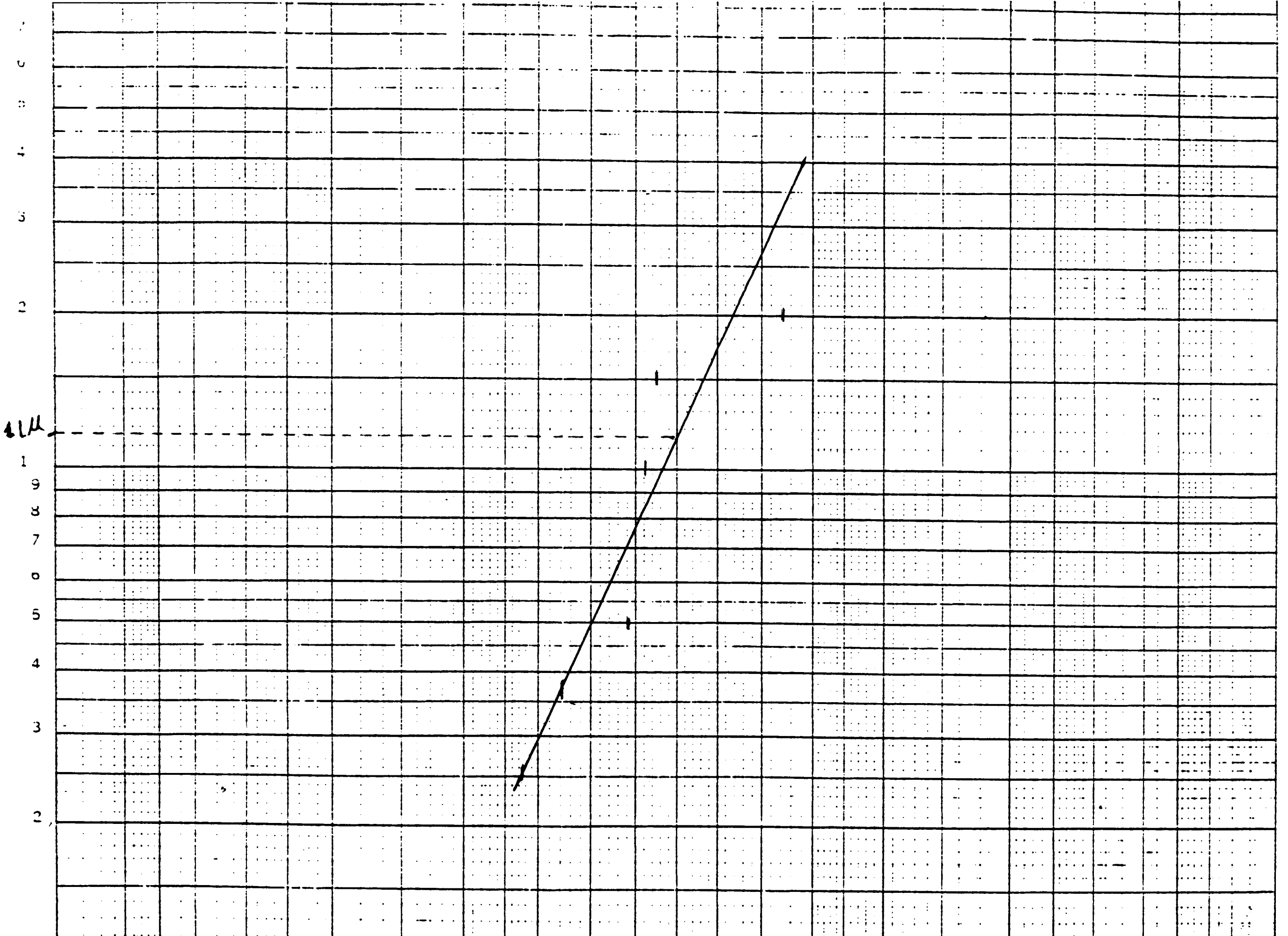
APLICACÍON DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE ACUERDO AL TAMAÑO DE PARTICULA.

Characteristics of Particles



APENDICE F

GRAFICA LOGARITMICA USADA PARA OBTENER EL DIAMETRO DE PARTICULA CARACTERISTICO SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN LOG – NORMAL.


1 μ
1
9
8
7
6
5
4
3
2

APENDICE G

TABLAS DE TEJIDOS Y SUS COSTOS

TABLA A

PROPIEDADES DE RESISTENCIA EN MATERIALES DE TEJIDO

TEJIDO	TEMPERATURA °F	RESISTENCIA ACIDA	RESISTENCIA ALCALINA	ABRASIÓN FLEXIBLE
Algodón	180	Pobre	Muy bueno	Muy bueno
Dacrón (polyester)	275	Buena con minerales ácidos	Bueno; regular en alcalinidad fuerte	Muy bueno
Fiberglas	500	Mas o menos a bueno	Regular a bueno	Regular
Nextel	1400	Muy bueno	Bueno	Bueno
Nomex	375	Regular	Excelente a baja temp.	Excelente
Nylon	200	Regular	excelente	Excelente
Orlon	260	Bueno a excelente	Regular a bueno en baja alcalinidad	Bueno
P84*	475	Bueno	Bueno	Bueno
Polipropileno	200	Excelente	Excelente	Excelente
Ryton	375	Excelente	Excelente	Bueno
Teflon	450	Inerte excepto para fluor	Inerte excepto para trifluoruro, cloruro y metales alcalinos	Regular
Lana	200	Muy bueno	Pobre	Regular a bueno

Fuente [5]

*Inspec Fibres Registered Trademark

TABLA B

PRECIO DE MANGAS

(2^{do} cuarto de 1998 en $/Pie^2)

TIPO DE LIMPIEZA	DIAMETRO DE MANGA (plg.)	PE	PP	NO	HA	FG	CO	TF	P8	RT	NX
Pulse-jet	4-1/2 a 5-1/8	0.75	0.81	2.17	1.24	1.92	NA	12.2	4.06	2.87	20.6
	6 a 8	0.67	0.72	1.95	1.15	1.60	NA	9.70	3.85	2.62	NA
Pulse-jet	4-1/2 a 5-1/8	0.53	0.53	1.84	0.95	1.69	NA	12.9	3.6	2.42	16.7
	6 a 8	0.50	0.60	1.77	0.98	1.55	NA	9.00	3.51	2.30	NA
Pulse-jet	4-7/8	2.95	NA	6.12	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
(cartucho)	6-1/8	1.53	NA	4.67	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Sacudimiento	5	0.63	0.88	1.61	1.03	NA	0.70	NA	NA	NA	NA
Sacudimiento	5	0.61	1.01	1.53	1.04	NA	0.59	NA	NA	NA	NA
Aire reverso	8	0.63	1.52	1.35	NA	1.14	NA	NA	NA	NA	NA
	11-1/2	0.62	NA	1.43	NA	1.01	NA	NA	NA	NA	NA
Aire reverso	8	0.44	NA	1.39	NA	0.95	NA	NA	NA	NA	NA
	11-1/2	0.44	NA	1.17	NA	0.75	NA	NA	NA	NA	NA

FUENTE [5]

NA = No aplicable

MATERIALES:

PE = 16 onzas de polyester
PP = 16 onzas de polypropileno
NO = 14 onzas de nomex
HA = 15 onzas de homopolymero acrílico
FG = 16 onzas de fiberglas con 10% de teflón
CO = 9 onzas de algodon
TF = 22 onzas de teflon afelpado
P8 = 16 onzas de p84
RT = 16 onzas de ryton
NX = 16 onzas de nextel

APENDICE H

TABLAS PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE FILTRACION.

TABLA C

FACTORES PARA LA RELACIÓN GAS - TELA EN PULSE – JET

FACTOR DE MATERIAL: A

15	12	10	9.0	6.0
Mezcla de pastel	Asbestos	Alúmina	Amonio	Carbón activado
Polvo de cartón	En pulición	Aspirina	Fertilizantes fosfáticos	Carbón negro (molecular)
Cocoa	Material celuloso	Carbón negro	Petroquímicas secas	Detergentes y otros dispersantes
Fluor	Fundición	Cemento	Tintura	Productos directos de reacción de polvo de tocador, leche y jabón
Granos	Perlita	Pigmentos	Ceniza volátil	
Polvo de cueros	Caucho	Cerámica	Oxidos metálicos	
Polvo en acerrios	Arena	Arcillas	Pigmentos metálicos y sintéticos	
Tabaco	Sal	Ladrillos	Plásticos	
	Talco	Carbón de piedra	Resinas	
		Polvo de rocas y minerales	Silicatos	
		Sílica	Almidones	
		Acido sorbico	Acido tánico	
		Azúcar		

FACTOR DE APLICACIÓN: B

Refiere a puntos de transferencia, estaciones de parqueo, etc	**1.0**
Colección de Productos: transporte de aire, molinos, clasificadores, conducción rápida	**0.9**
Filtración de gas: conducción de spray, hornos, reactores, etc	**0.8**

Fuente [5]

TABLA D

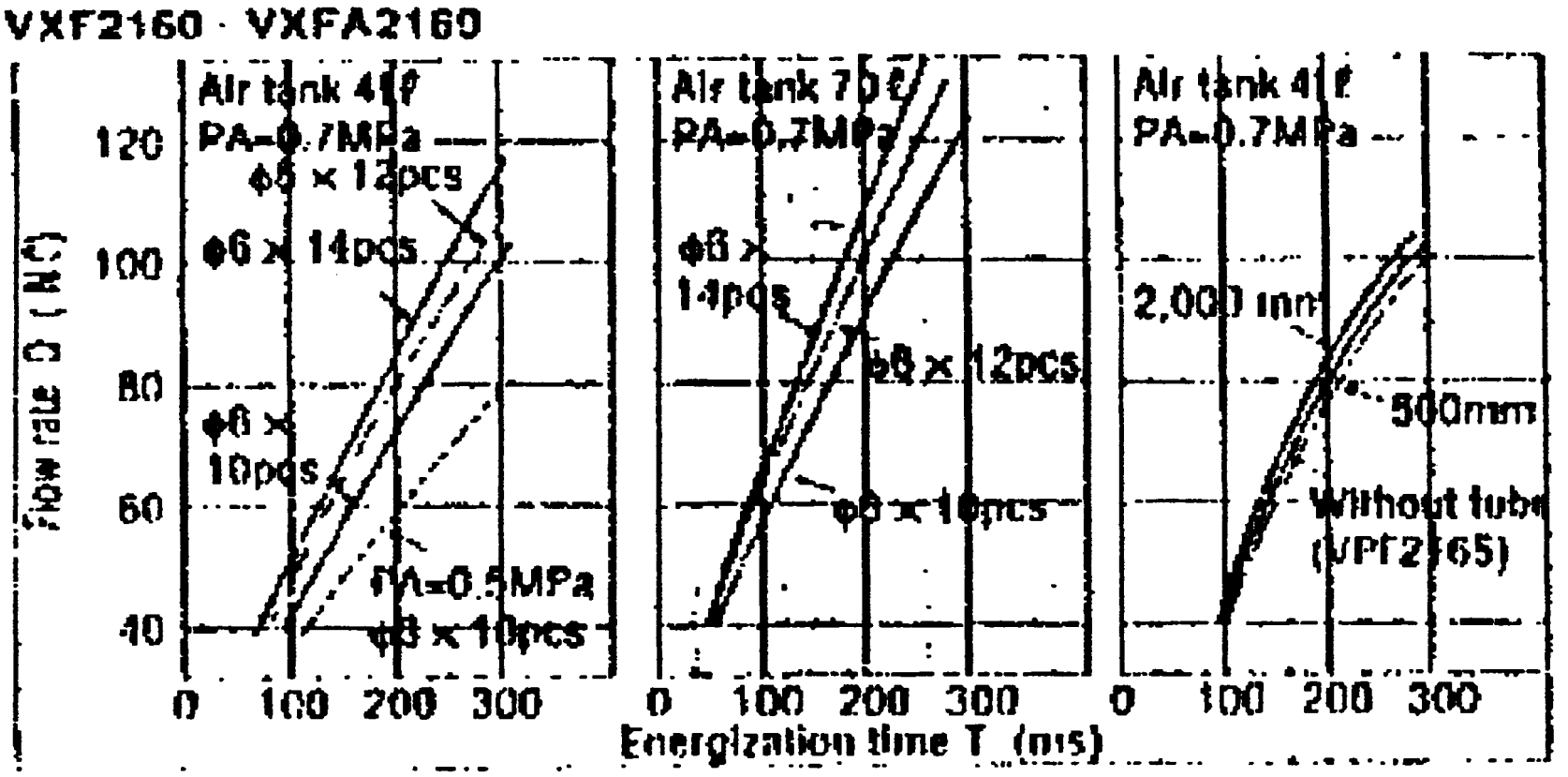
RELACIONES DE GAS – TELA EN COMBINACIÓN DEL TIPO DE LIMPIEZA Y TEJIDO APLICADO

POLVO	SACUDIMIENTO/TEJIDO TRAMADO AIRE REVERSO/TEJIDO TRAMADO	PULSE-JET / TEJIDO FIELTRO AIRE REVERSO/TEJIDO FIELTRO
Alúmina	2.5	8.0
Asbestos	3.0	10
Bauxita	2.5	8.0
Carbón negro	1.5	5.0
Cal	2.5	8.0
Cocoa, chocolate	2.8	12
Cemento	2.0	8.0
Cosméticos	1.5	10
Esmalte	2.5	9.0
Granos	3.5	14
Feldespato	2.2	9.0
Fertilizantes	3.0	8.0
Fluor	3.0	12
Ceniza volátil	2.5	5.0
Grafito	2.0	5.0
Oxido de hierro	2.5	7.0
Sulfato de hierro	2.0	6.0
Mica	2.7	9.0
Pigmentos de pintura	2.5	7.0
Papel	3.5	10
Plásticos	2.5	7.0
Arena	2.5	10
Silica	2.5	7.0
Detergentes	2.0	5.0
Azúcar	2.0	13
Talco	2.5	5.0
Tabaco	3.5	
Oxido de zinc	2.0	

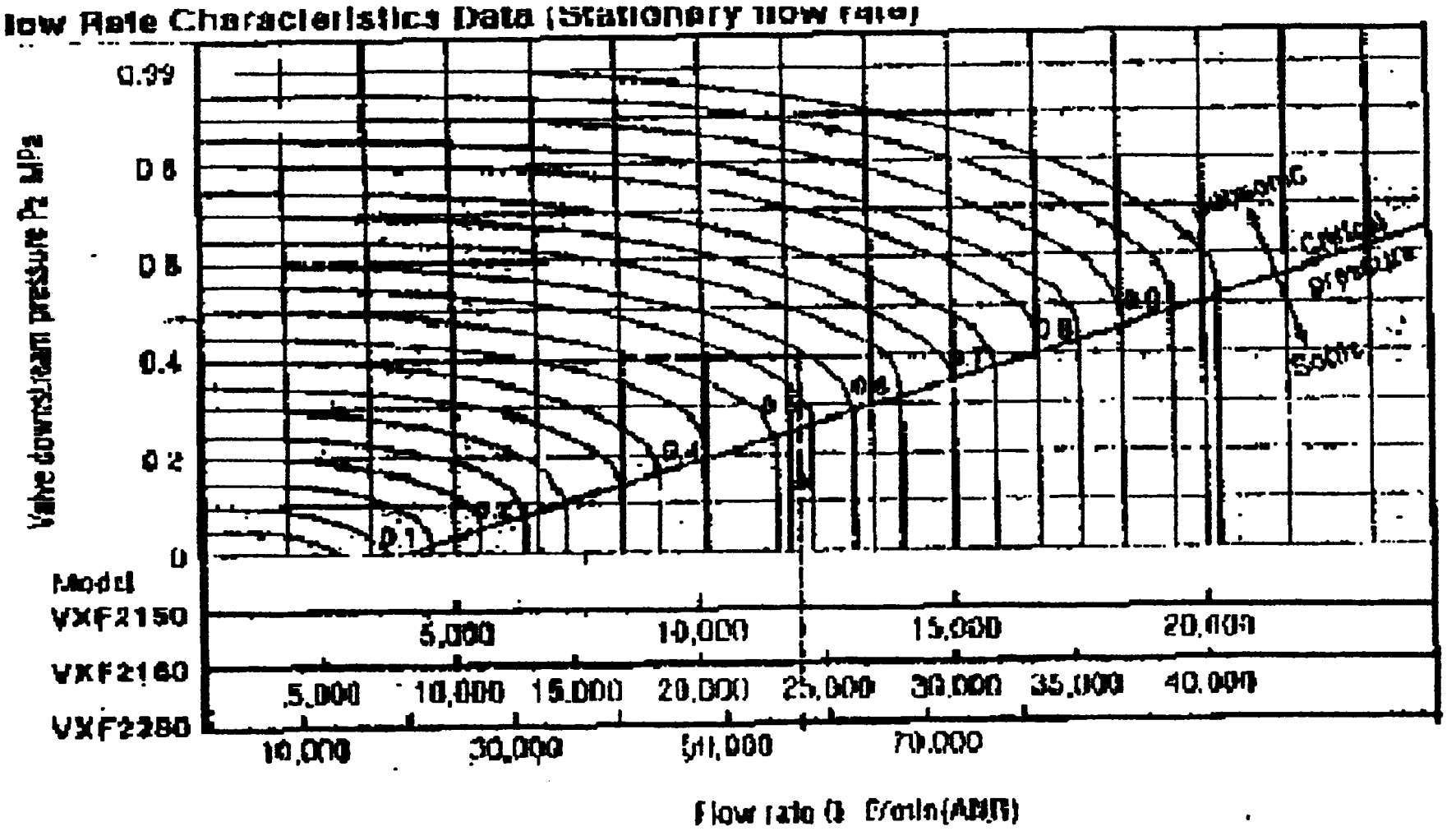
Fuente [1]

APENDICE I

TABLAS PARA SELECCIÓN DE ELECTROVÁLVULAS



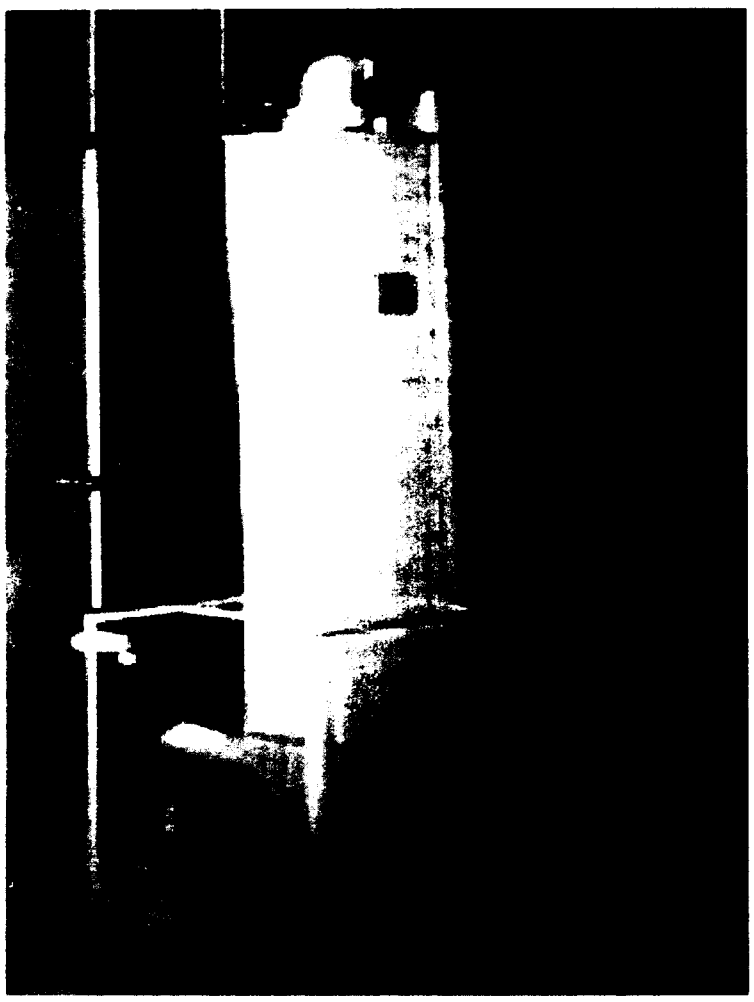
Selección de Válvulas según Número de Mangas a Limpiar



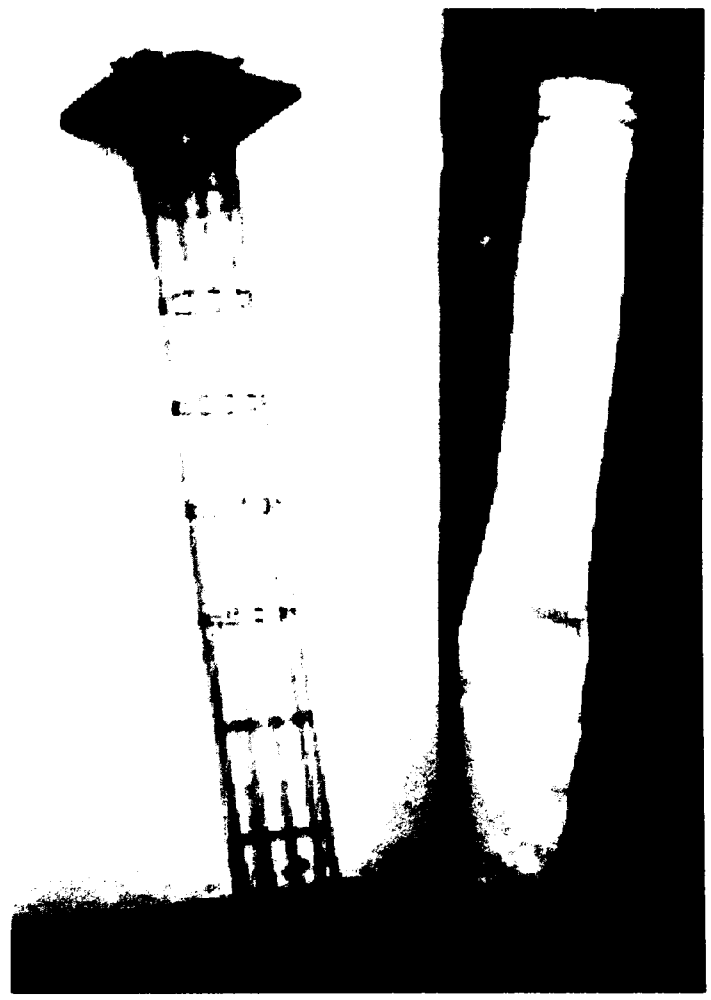
Selección de Válvula de Acuerdo a la Relación de Flujo

APENDICE J

FOTOS DEL FILTRO PROTOTIPO

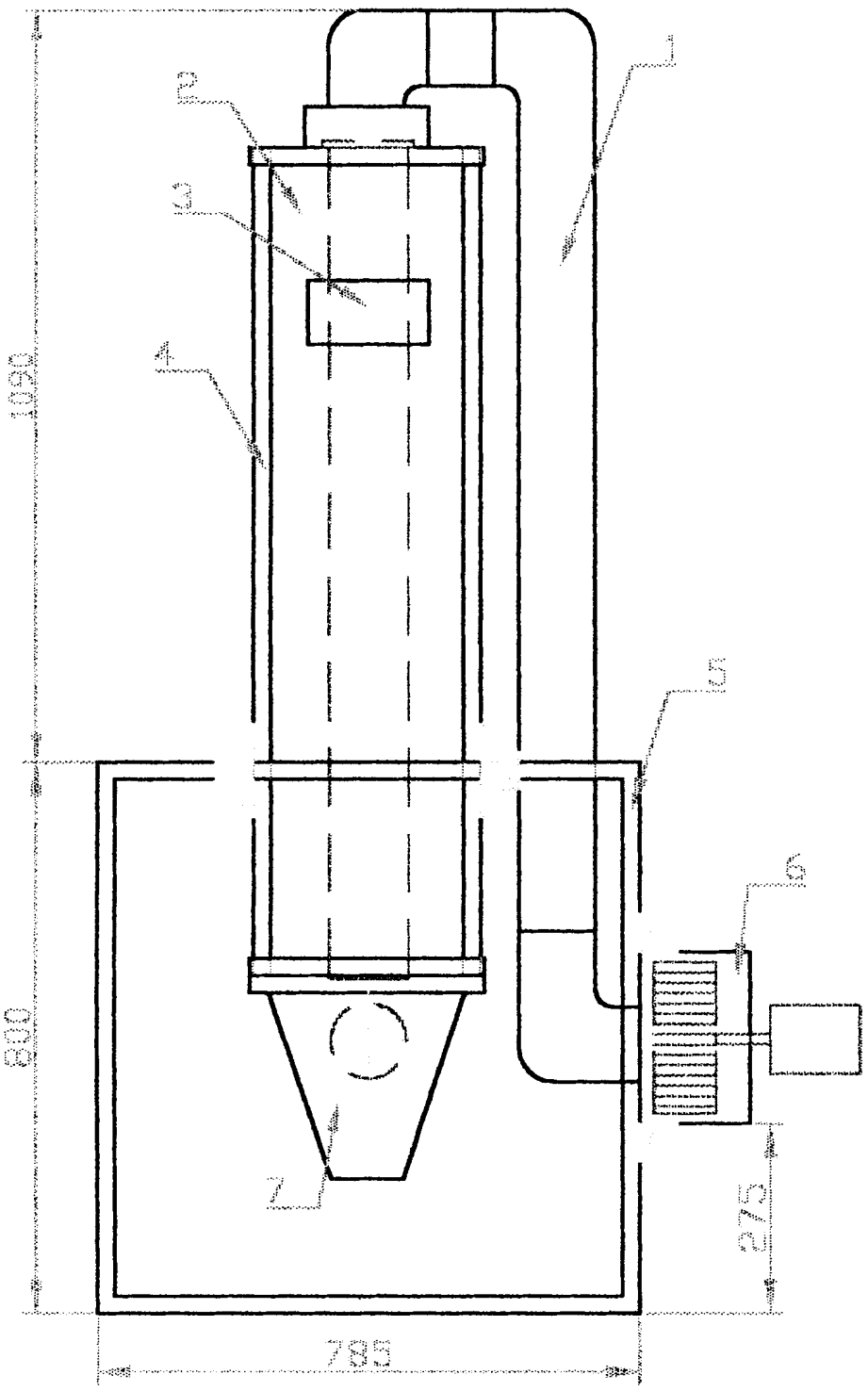


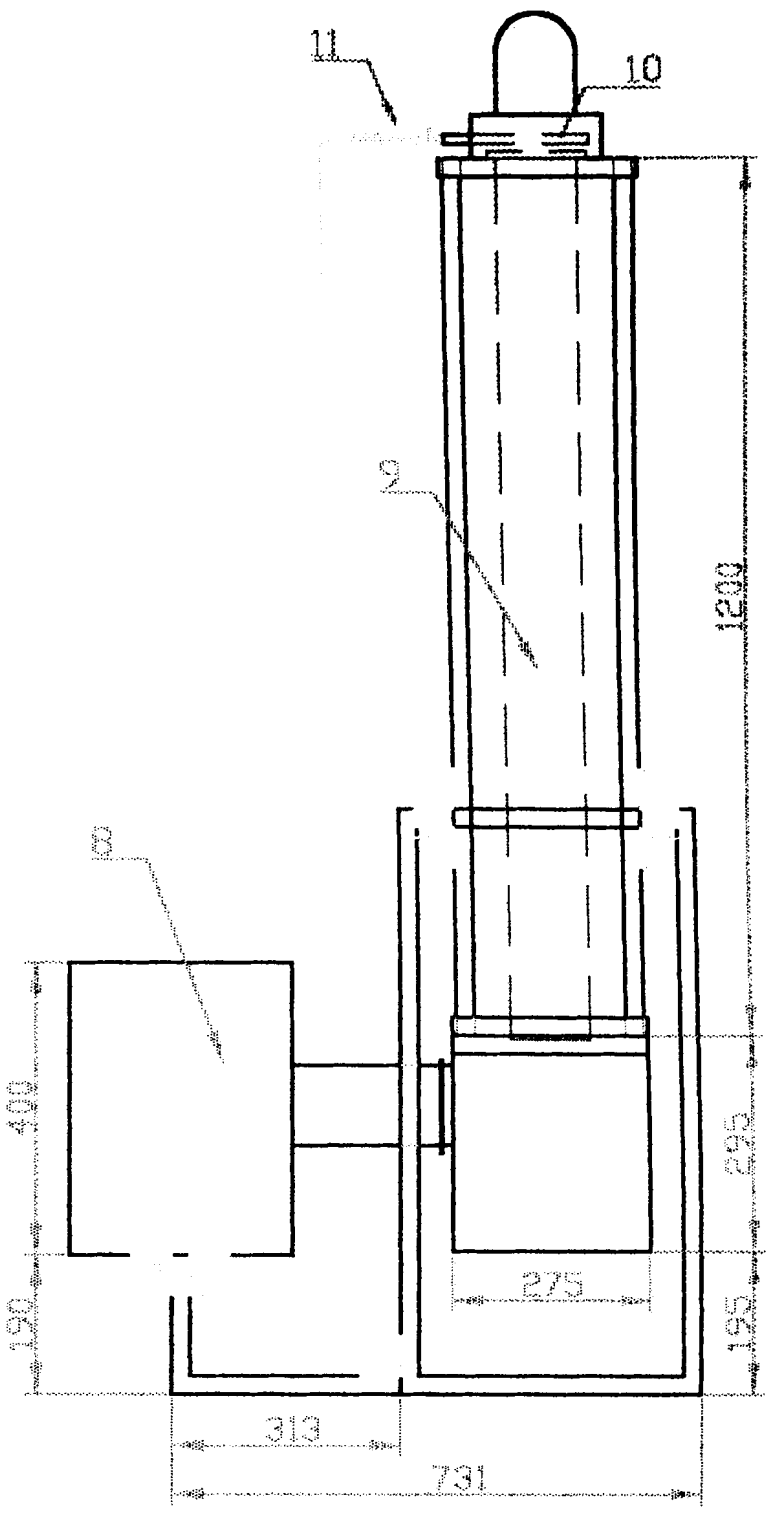
1) Prototipo del Filtro Pulse - Jet



2) Conjunto "Manga-Canastilla-venturi"

3) Sistema de Manga Después de Filtración





ITEM	NOMBRE	No:	MATERIAL	DETALLE
11	Electroválvula		VXF2160	pulso de 80 psi
10	Tubo Inyector		galvnizado 1/2""	L= 200mm
9	Manga-Canastilla		polyester	de 16 onzas
8	Camara de Polvo		tanque de pvc	
7	Tolva de Colección		110 de 1/8""	
6	Ventilador		1/4 Hp	centrífugo
5	Base de Filtro		L 25x2	
4	Estructura		L 25x2	
3	Visor		transparente	130x100
2	Cuerpo Principal		1010 de 1/8""	
1	Tubo de Succión		pvc de 110mm	

FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA Y CIENCIA DE LA PRODUCCION

	FECHA	NOMBRE
Dib.	16/04/01	G. Peralta
Rev.		
Apro.		

DENOMINACION:
PROTOTIPO DEL FILTRO DE MANGAS PULSE-JET

ESCALA
1:13

PLANO No:
01

BIBLIOGRAFIA

1 BENITEZ JAIME, Process Engineering And Design For Air Pollution Control, Ptr Prentice Hall, 1993.

2 COMMITEE ON INDUSTRIAL VENTILATION. Industrial Ventilation (A Manual Of Recommended Practice, Edwards Brothers Press), 15th Edition, 1978.

3 COOPER AND ALLEY, Air Pollution Control, Waveland Press Inc., Second Edition,1994.

4 EPA, Control de Emisiones de Partículas, Curso 413, 1993.

5 EPA, Diseño de Equipos de Control de Contaminación, Capítulo Cinco, Filtros de Tejido, 1998

6 EPA - CICA, Tecnología de Control de Contaminantes del Aire, Filtro de Tela Lavado por Chorro Pulsante, Hoja de Datos,1998.

7 EPA, Documentación de Factores de Emisiones de AP-42, Sección 11.6, Manufactura de Cemento Portland, 1998

8 FOX Y McDONALD, Introducción a la Mecánica de Fluidos, Editorial McGraw-Hill, Segunda Edición, 1995.

9 WARK Y WARNER, Contaminación del Aire (Origen y Control), Editorial Limusa, Segunda Edición, 1992.

10 WOODS, Guía Práctica de la Ventilación, Editorial Blume, Primera Edición en Español, 1970.

11 ZAMBRANO CARLOS, Medición y Evaluación de la Contaminación del Aire, Debido a Partículas Menores a 10 μm En la Ciudad de Guayaquíl, Facultad de Ingeniería En Mecánica y Ciencias de la Producción, Espol, 1998.