

T
621.9
A643



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica



“Diseño y Construcción de un Colector de Mangas”



TESIS DE GRADO



CIB-ESPOL

CIB-ESPOL

Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:
NELSON ALBERTO APOLÓ MERA



Guayaquil

Año
1996

Ecuador

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Manuel Helguero, Director de
Tesis, que con su experiencia y
conocimiento ayudó a la realización de
este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen del Cisne...

A mis padres por enseñarme que la
Educación es la luz que ilumina el
difícil camino del hombre en su paso
por la vida



BIBLIOTECA
CENTRAL

TRIBUNAL DE GRADUACION

Ing. Eduardo Rivadeneira

DECANO DE LA FIM

Ing. Manuel Helguero

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ricardo Cassis

VOCAL

Ing. Rodolfo Paz

VOCAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



NELSON ALBERTO APOLO MERA

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	V
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE ABREVIATURAS	IX
INDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE TABLAS	XV
CAPITULO I	
ANTECEDENTES	
1.1 Justificación del Proyecto y definición del Problema	
en la Industria Nacional	17
1.2 Contaminación Ambiental y Tipos de filtros Colectores de partículas	18
1.3 Diseño de Forma Preliminar y Alternativas de Solución	25
CAPITULO II	
FUNDAMENTOS TEORICOS	
2.1 Principios de Transporte Neumático en ductos	31
2.2 Flujo de dos Fases (Gases y Sólidos)	33
2.3 Teoría de Filtración	37
2.3.1 Consideraciones en el diseño del filtro recolector de partículas	42
2.3.2 Capacidad de Filtración	46
2.3.3 Sistema de Limpieza del filtro recolector	61
2.3.4 Resistencia a la corrosión	66
2.3.5 Confiabilidad y Mantenimiento del filtro recolector	68
2.4 Componentes Auxiliares	69

CAPITULO III

CALCULOS Y DISEÑO INGENIERILES

3.1	Diseño definitivo de la Unidad	77
3.1.1	Elemento filtrante	95
3.1.2	Ventilador	98
3.1.3	Silo de Almacenamiento	99
3.2	Ciclo de Fabricación de los diferentes elementos	129
3.3	Montaje y Puesta a Punto	134

CAPITULO IV

ANALISIS DE COSTOS Y FACTILIDAD

4.1	Costos en el Diseño	136
4.2	Factilidad de los componentes	141

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APENDICES

PLANOS

BIBLIOGRAFIA



UB-ESPU



UB-ESPU

RESUMEN

La industrialización ha provisto a la humanidad con muchos materiales y beneficios sociales y de la misma manera esta les ha otorgado problemas irreparables para su ecosistema que aumentan los problemas a la sociedad, siendo uno de ellos la polución ambiental.

La idea de este proyecto es de explicar la doble finalidad que tienen actualmente los filtros recolectores de partículas en suspensión en los diferentes procesos en la industria tanto química, mecánica, metalúrgica, agrícola, etc. que son el control de la contaminación ambiental y la disminución del desperdicio de materia prima en la obtención del producto final.

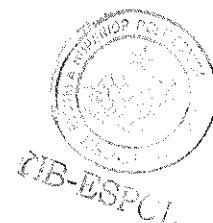
El Proyecto como tal tiene una extensa gama de aplicaciones de acuerdo a las necesidades del problema a solucionarse, puesto que cubre todas las dimensiones en lo que se refiere a granulometría de las partículas contaminantes de los polvos industriales, que resultan en la mayoría de los casos nocivos para el bienestar de la población asentada en los alrededores de estas instalaciones industriales, y además hay que tomar en cuenta que nuestro país afronta un nuevo reto a nivel del desarrollo comercial con nuestros hermanos del Pacto Andino.

Debemos hacer conciencia en la disminución de costos en la obtención del producto final razón por la cual el desperdicio de materia prima deberá disminuirse al mínimo. Con la ejecución de este proyecto que detalla el proceso de selección y construcción de un medio filtrante, no solo fomentaremos un desarrollo industrial en cuanto a nivel tecnológico, sino que estaremos en capacidad de:

- Eliminar la importación de estos equipos de filtración
- Usar la mano de obra calificada Nacional
- Disminución de la fuga de divisas
- Disminuir la dependencia de la asistencia técnica extranjera
- Eliminar la dificultad en la obtención de repuestos

En los próximos capítulos se explicará en forma generalizada la importancia de la filtración de las partículas en suspensión , el criterio técnico en la selección del problema, las diferentes soluciones recomendadas hasta obtener por medio de una matriz de decisión, la solución más idónea para nuestro medio.

Solamente si hacemos que un producto sea lo menos costoso manteniéndose dentro de los parámetros de la filosofía de la calidad garantizaremos éxitos en el crecimiento de la eficiencia de la productividad en la Industria Nacional.



INDICE DE ABREVIATURAS

	Pág.
F_d fuerza de arrastre	32
A_t sección transversal de la partícula sólida	32
V_f velocidad del fluido	32
V_s velocidad del sólido	32
C_d coeficiente de arrastre/fuerza de arrastre	32
Re_s número de Reynolds del sólido	32
ρ_a densidad del aire	33
d_p diámetro de la partícula	33
V_a velocidad del aire	33
$V_{c,h}$ velocidad mínima de acarreo horizontal	34
D_s diámetro de la partícula más grande que se va a transportar	34
ρ_s densidad de las partículas sólidas	34
$V_{c,v}$ velocidad mínima de acarreo vertical	34
$\Delta P_{a,G}$ caída de presión por aceleración del gas	35
G_G velocidad de masa del gas	35
V_G velocidad real del gas	35
g_c constante adimensional	35
$\Delta P_{a,s}$ caída de presión por aceleración de partículas sólidas	35
G_s velocidad de masa de los sólidos	35
V_s velocidad real de los sólidos	35
$\Delta P_{t,G}$ caída de presión entre el gas y la pared de la tubería	35
f_G factor de fricción de sólidos	35
L longitud de la tubería	35
ρ_{dG} densidad del gas disperso	35
D_t diámetro de la tubería	35

	Pág.
$\Delta P_{f,s}$ caída de presión combinada de un fluido	35
f_s factor de fricción de sólidos	35
d_s diámetro de los sólidos	35
ρ_G densidad del gas	35
ρ_{d_s} densidad de los sólidos dispersos	36
μ_G viscosidad del gas	36
V'_G velocidad superficial del gas	36
Δp_t suma de las caídas de presión debidas a la fricción	36
w_s velocidad de flujo de los sólidos	36
A área de la sección transversal de la tubería	36
G_a velocidad de masa del aire	36
$\Delta P_{h,g}$ caída de presión para el soporte de la columna de gas	37
g aceleración debida a la gravedad	37
$\Delta P_{h,s}$ caída de presión para el soporte de los sólidos	37
Cr arrastre residual	46
V_f velocidad de filtración	47
Q razón de flujo volumétrico	47
A área neta filtrante	47
V_{ef} velocidad efectiva de filtración	49
V_{fn} velocidad nominal de filtración	49
V_c velocidad de pasadizo del filtro	49
P caída de presión a través de la fibra	51
K constante de Boltzman	51
V velocidad de filtración superficial	51
ΔP_c caída de presión a través del filtro colector	54
S arrastre del filtro	54
V_p presión de velocidad	79

	Pág.
he pérdidas a la entrada del ducto	80
hc pérdidas presentes en el codo	80
hl pérdidas por longitud de tubería	80
SP presión estática	80
n número de mangas de filtración	96
At área transversal de filtración de la manga	96
r radio de la manga filtrante	96
L longitud de la manga filtrante	96
W peso del material a utilizarse	101
I Inercia	102
w carga distribuída	102
M _{max} momento máximo flector	102
L longitud de la viga uniformemente distribuída	102
σ _{min} esfuerzo mínimo	102
c distancia del eje medio	102
T esfuerzo cortante	103
F fuerza	103
σ _{max} esfuerzo máximo	104
S _y resistencia a la fluencia	104
S _{ut} esfuerzo último a la tracción	104
Se' límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico	104
Se límite de resistencia a la fatiga de la muestra de viga rotatoria	104
K _a factor de superficie	104
K _b factor de tamaño	104
K _c factor de confiabilidad	104
K _d factor de temperatura	104
K _e factor de modificación con concentración de esfuerzo	104

	Pág.
Kf factor de efectos diversos	104
Kt factor de concentración de esfuerzo	106
q sensibilidad a las ranuras	106
σ_m esfuerzo medio	108
I_x Inercia con respecto al eje de las x	112
k radio de giro	112
l longitud de la columna de Euler	113
c relación de rígidez	113
E módulo de elasticidad	113
n factor de seguridad	114
L agarre del perno	116
K_b constante de rígidez del perno	116
K_m constante de rígidez de la junta	117
d diámetro del perno	117
C relación de rígidez en pernos	118
F_i Precarga del perno	120
A_t Área de esfuerzo de tensión	120
N número de pernos	120
F_p carga de prueba	121
S_p esfuerzo de tensión	121
S_t esfuerzo producido en la chapa soldada	122
F fuerza nominal media	122
t espesor de la chapa más delgada	122
L_c longitud del cordón	122
σ_x esfuerzo en la garganta en el eje x	124

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPITULO 1	
Fig.	
1 Cámara de Sedimentación	21
2 Ciclón Separador Típico	22
3 Precipitador Electroestático Típico	23
4 Esquema General de un Scrubber	24
5 Corte Transversal de un Colector de Bolsas Pulse Jet	25
6 Eficiencia de colección versus diámetro de partícula por tipo de colector	27
CAPITULO 2	
Fig.	
1 Mecanismo de captura de la partícula por impactación	39
2 Mecanismo de captura de la partícula por intercepción	40
3 Mecanismo de captura de la partícula por difusión	41
4 Esquema de curva de rendimiento en un colector de polvo simple	53
5 Entrelazado simple de la fibra	56
6 Entrelazado de tejido 3 / 1	57
7 Entrelazamiento de tejido tipo Sateen	57
8 Esquema de un Sistema de limpieza por Sacudido	63
9 Esquema del Sistema de limpieza de aire reverso	64
10 Esquema de un Sistema de limpieza pulso de aire a chorro	66
11 Válvula Rotativa o Rotatoria Simple	69
12 Válvula de Doble Compuerta	70



Fig.		Pág.
13	Transportador Sin Fin en un colector de polvo	71
14	Tipo de Tolvas	73
15	Modelo para calcular los esfuerzos presentes en el espejo del colector	101
16	Diagramas de esfuerzos cortantes	103
17	Diagrama de Goodman modificado para el colector de mangas	108
18	Diagrama de esfuerzos de columnas en compresión	111
19	Junta entre la cámara limpia y sucia del colector de mangas	116
20	Esquema de soldadura típica transversal	123
21	Distancia de la flauta de limpieza al espejo del colector	128
22	Diagrama PERT del ciclo de fabricación del colector de polvo	133
23	Diagrama PERT de montaje y puesta a punto	135

INDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA I Matriz de decisión para la selección del equipo colector de polvo a desarrollar en este proyecto	28
TABLA II Velocidad de filtración recomendada para cada tipo de material según sistema de limpieza en el diseño	48
TABLA III Propiedades de las telas filtrantes	59
TABLA IV Factores de modificación de acabado superficial para el acero	105
TABLA V Diagramas para factores teóricos de concentración de esfuerzo	106
TABLA VI Diagrama de sensibilidad a las ranuras para materiales en torsión invertida alternativamente	106
TABLA VII Módulo de elasticidad para materiales de empaquetaduras	117
TABLA VIII Características de roscas unificadas UNC	119
TABLA IX Factores Kf de reducción de resistencia a la fatiga, para elementos roscados	120
TABLA X Especificaciones y marcas de identificación para pernos, tornillos y esparrágos	121
TABLA XI Valores de esfuerzos de tensión según el tipo de soldaduras	123

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 JUSTIFICACION DEL PROYECTO Y DEFINICION DEL PROBLEMA EN LA INDUSTRIA NACIONAL

Por primera vez en la historia del Ecuador, en Septiembre de 1993, con Decreto Ejecutivo 1107, se estableció un mecanismo para sistematizar, racionalizar y propender al cumplimiento de una gestión ambiental adecuado por parte de todos los habitantes del país, que es la Comisión Asesora Ambiental de la Presidencia de la República (CAAM).

A partir de entonces, era lógico preparar y poner en vigencia, luego de una amplia y transparente consulta y participación de la sociedad ecuatoriana, tres elementos indispensables para fijar un camino coherente y práctico "Principios Básicos para la Gestión Ambiental en el Ecuador", "Políticas Básicas Ambientales del Ecuador" y el "Plan Ambiental Ecuatoriano" (....)

El anterior parrafo nos muestra un interés común de todo el pueblo ecuatoriano de mejorar la calidad de vida de su medio ambiente para las futuras generaciones, que han de contribuir con su esfuerzo y trabajo en el progreso del país, es por esto que si en años pasados no se tomaron en consideración los niveles máximos de emisiones de los contaminantes al aire o al agua, con el desarrollo del Plan Ambiental Ecuatoriano se exigirá a aquellas industrias que emanan emisiones de polvo o gases en forma incontrolable, realizar un estudio de contaminación en la forma como usan sus materias primas para la obtención de su insumo final, es así que en el caso de los contaminantes sólidos en suspensión de partículas muy fina que no pueden ser colectadas por los ciclones separadores deberán de ser capturadas por otro tipo de equipo de control, en este caso el más aconsejable es el colector de polvo tipo pulse jet, que será el objeto de nuestro estudio.

Si pensamos en el desarrollo del país en el Futuro, basado en una política ambientalista la construcción de colectores de polvo para la industria nacional, es una fuente de trabajo no desarrollado. Actualmente en América del Sur, existen países dedicados a

este tipo de tecnología, tales como Argentina, Chile y Colombia donde las normas de Seguridad que exige el estado oscilan entre 150 ug / m³ por lo tanto es aconsejable proyectar que nuestro país ha de alcanzar las mismas exigencias en el control de emisiones si ahora no hacemos nada por disminuirlas.

1.2 CONTAMINACION AMBIENTAL Y TIPOS DE FILTROS COLECTORES DE PARTICULAS

La contaminación es un tópico que ha estado entre otros, en la parte más adelantada de la inquietud social desde muchos años atrás. Muchos ecologistas reconocen a la contaminación como una seria amenaza a la calidad de nuestra vida para la posibilidad de su existencia, es así que a medida que el hombre realiza avances significativos en su actividad industrial, relaciona cada vez más el crecimiento de la contaminación con el desarrollo tecnológico, por lo tanto, desde que la contaminación es compañera con muchas actividades industriales, mejores métodos de control de contaminación deben ser empleados.

El mejor método de control existente hasta la actualidad para evitar la contaminación industrial es cambiar el proceso contaminante por uno que no la produzca a sus alrededores. Usualmente esto no es fácil, y por lo tanto se han desarrollado algunos métodos de control. Generalmente estos adicionan costos en el proceso y en la mayor parte de ese costo es absorbido por los consumidores del producto.

En pocas ocasiones el valor del material será recuperado en el proceso de control de la polución, en muchos casos, por lo tanto, la recuperación del material no será usado en su totalidad y el grado de eficiencia de colección más económico para la recuperación del material será el más adecuado para un efectivo control de la contaminación.

Cuando el costo social de la contaminación es considerado, como daños a la salud de la gente de la comunidad, daños en la salud de los trabajadores en la planta, daños a la

propiedad, un alto grado de control de la contaminación es lo más indicado. Los siguientes tipos de contaminación son generalmente reconocidos:

- A. Contaminación del agua: La presencia en concentraciones más altas que las normales de disoluciones de material extraño como sales químicas, materia orgánica, elementos metálicos o nutrientes suspendidos en medios acuosos naturales como lagos, corrientes, ríos y Océanos.
- B. Contaminación del aire: La presencia de partículas sólidas en la atmósfera o partículas líquidas en forma de gotas o componentes gaseosos los cuales no están normalmente presentes o están presentes en concentraciones substancialmente más grandes que las normales.
- C. Contaminación por deshechos: Es la presencia en la tierra o en el agua de material sólido, orgánica o inorgánica, el cual no tiene calidades benéficas.
- D. Contaminación química: La presencia en tejidos vegetales y animales, de servicio alimenticio con químicos adulterados que no tienen beneficios.
- E. Contaminación por ruido: La presencia en la atmósfera abierta o en un espacio confinado de ruido generalmente considerado indeseable, excepto posiblemente por la responsable de él.
- F. Contaminación térmica: La descarga en el interior de los alrededores de una corriente de aire o de agua, la cual está en una temperatura diferente de los alrededores del punto de descarga o aguas abajo de este punto.

Sucesivamente la experiencia pasada o pruebas preliminares en la evaluación de colectores demuestran puntos externos para la mejor alternativa de control de la contaminación y sus rangos de costos aproximados. La selección preliminar puede comenzar con el rango del tamaño de partícula y propiedades, al igual como las características de

corriente de aire. La evaluación puede ser hecha por comparación del rendimiento del proyecto, eficiencia, espacio, energía, caída de presión, temperatura de servicio, límites de emisión y costos aproximados de operación y desarrollo. Existen dos tipos de Equipos de Control de la Polución, clasificados de acuerdo al diámetro de la partícula a recolectarse :

A. COLECTORES PRIMARIOS

Algunas décadas atrás fueron los recolectores principalmente usados, pero ahora usualmente sirven para colectar diámetros de partículas más gruesa delante de otros colectores de mayor eficiencia. Pero cuando una carga de polvo pesado de partículas largas, como virutas de madera, necesitan ser colectadas todavía tienen que ser considerados. Existen diferentes tipos de colectores primarios :

a. cámara de sedimentación: un cerramiento que es lo bastante más largo en su sección transversal que el ducto de conducción, la misma que reduce la velocidad de la corriente de aire baja la velocidad de asentamiento para las partículas de polvo deseado. El polvo va asentarse al fondo de la cámara para la descarga y la conducción del aire limpio puede salir a través de un ducto a una velocidad normal.

Usualmente un plato de obstrucción es colocado justo en el interior a la entrada de la cámara para ayudar a mantener el asentamiento del polvo, siendo la velocidad del aire que fluye alrededor del desviador conocido como bafle, y a través de la sección de recolección que es lo bastante baja para que no exista recaptura, o recolección de partículas finas de polvo, y es por eso que se lo usa para tamaños de partículas de alrededor de 40 micrones y aún mayores con una caída de presión de 1 a 3 pulgadas de agua, con una eficiencia del 50 al 75 %.

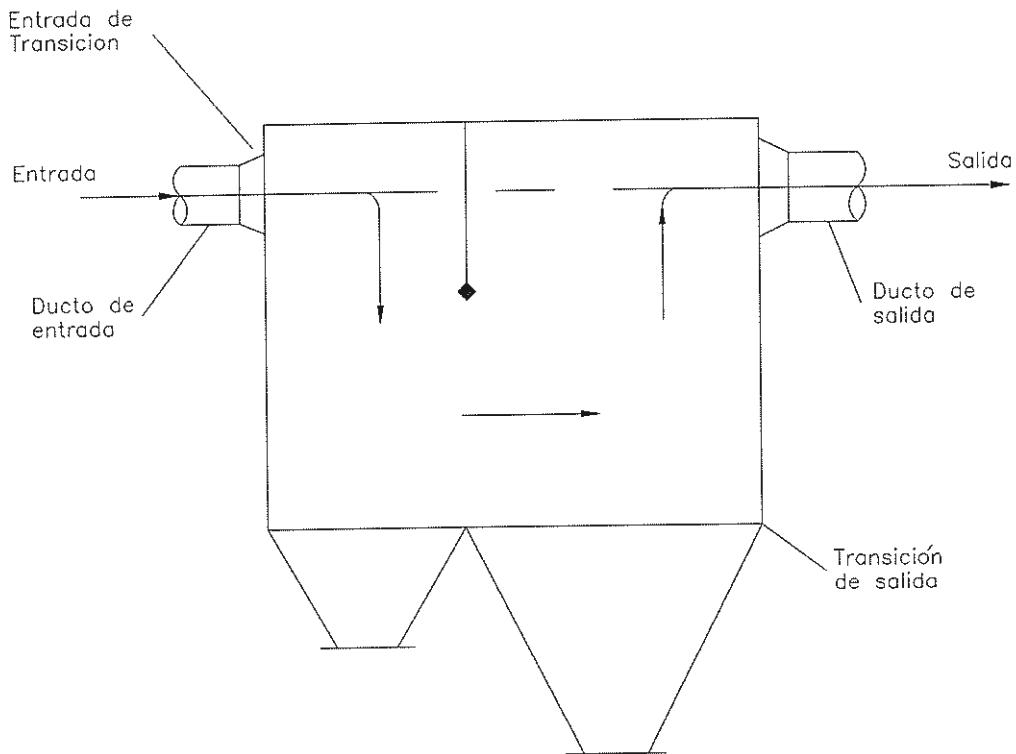


Figura 1.1 Cámara de Sedimentación

b. Ciclones: es básicamente un cilindro con una entrada horizontal tangencial, en la parte de arriba una salida vertical diseñada para producir velocidades más bajas que la entrada y una campana cónica de reducida sección en el fondo con un cierre de aire en la descarga de polvo fuera de la válvula.

El flujo de entrada es deflectado por la entrada tangencial y las paredes interiores del ciclón, causando un cambio rápido en dirección que separa las partículas de la corriente de aire por la fuerza centrífuga y el impacto en las paredes. Es usual su aplicación para diámetros de partículas de 10 a 40 micrones con una caída de presión de 2 a 3 pulgadas de agua a una eficiencia del 80 al 95 %.

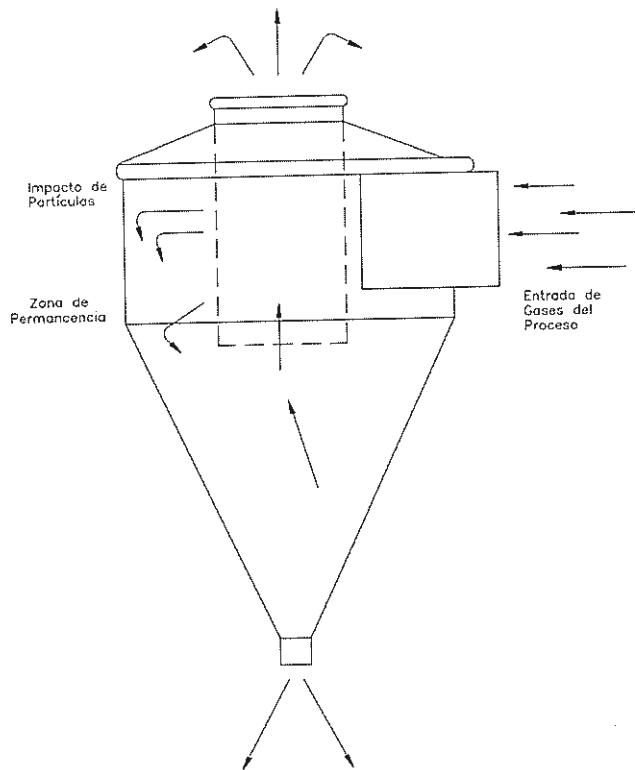


Figura 1.2 Ciclón Separador Típico

c. Precipitadores Electroestáticos: La corriente de gas es pasada a través de unos alambres o platos cargados eléctricamente, donde las partículas de polvo se recogen a una carga. La corriente de aire así pasa a través de un segundo conjunto de alambres o platos con una carga opuesta, el cual atrae las partículas de polvo.

Periódicamente los alambres o placas de colección son osciladas, causando que el polvo descienda dentro de una tolva o sección modular que puede ser cerrada y la carga removida en un período de limpieza. Los precipitadores pueden colectar partículas tan pequeñas como el humo de un cigarrillo cercana a $0.1 \mu\text{m}$, teniendo una eficiencia de colección de 98 a 99.9% y son usados a volúmenes de corrientes de aire a temperaturas superiores en 540°C .

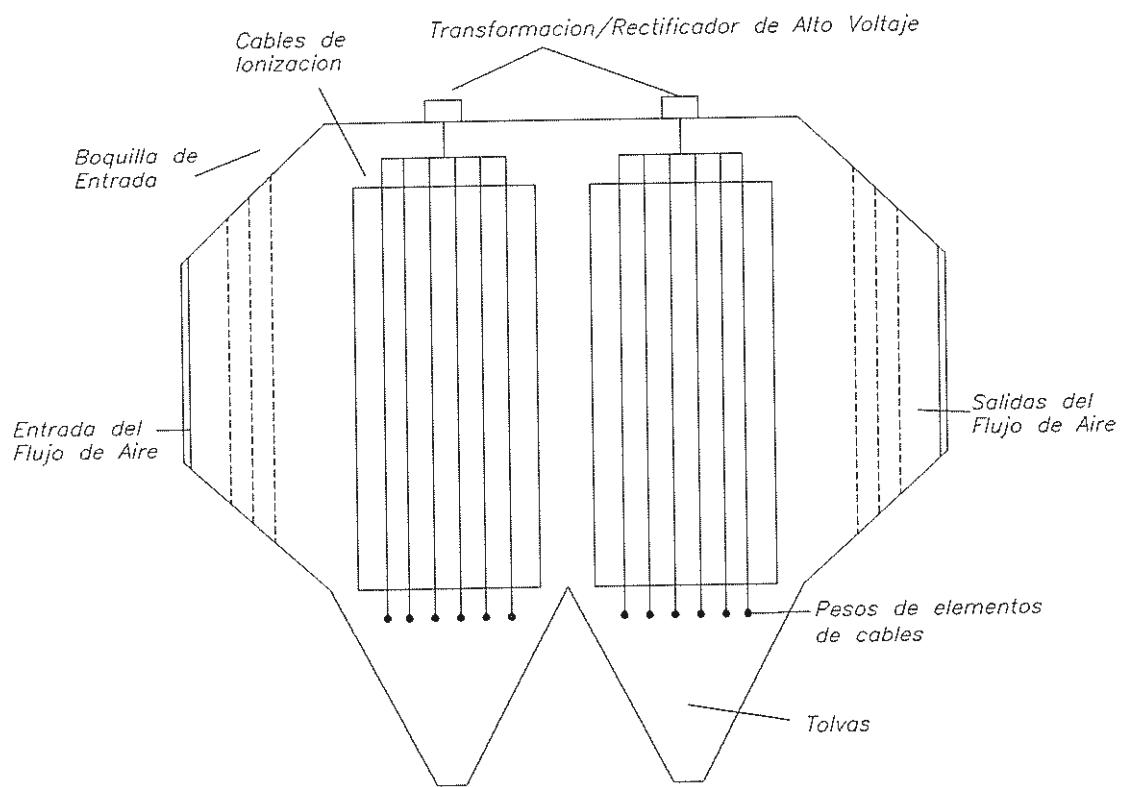


Figura 1.3 Precipitador Electroestático típico

d. Scrubbers Húmedos: Estos dispositivos usan agua atomizada para colectar el polvo, neblina o humos desde una corriente de aire que cruza a través del spray. La disposición de colectar polvo húmedo o espeso puede llegar a ser un paso costoso, involucrando tratamiento del agua o un sistema de reparación, de otra forma algunos materiales descargados húmedos pueden ser retomados directamente, reciclados o nuevamente usados en el proceso.

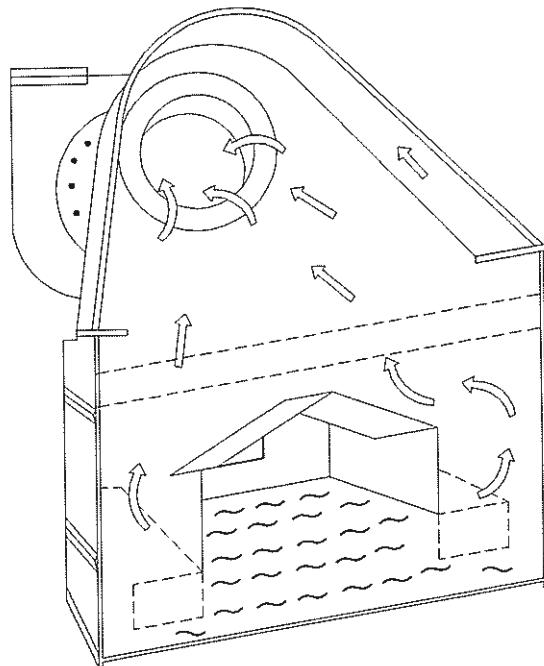


Figura 1.4 Esquema general de un Scrubber

f. Filtros Colectores: Estos colectores usan medios porosos para la separación de partículas finas de polvos contaminantes de las corrientes de aire a eficiencias superiores al 99.99 %. Los filtros son dispositivos en el cual la partícula es removida desde la corriente de un fluido por retención en una estructura porosa a través del cual el fluido fluye.

Los mecanismos de captura de la partícula son impactación, intercepción y difusión. Las fibras tejidas y no tejidas son usualmente usadas, pero las tejidas agujereadas o de barreras de metal sinterizado son ocasionalmente requeridas.

La caída de presión a través del medio filtrante depende de la razón de flujo, la carga de la partícula de entrada, las características del medio filtrante, y la frecuencia y eficacia del método de limpieza. De estos equipos se hablará con mayor detalle más adelante.

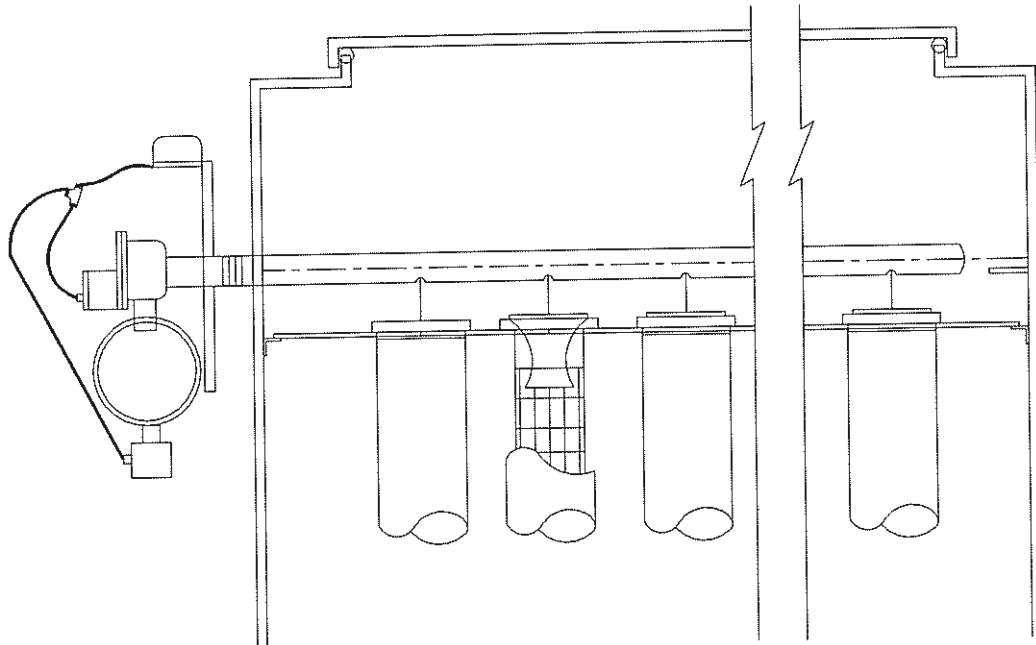


Figura 1.5 Corte Transversal de un colector de bolsas Pulse Jet

B. FILTRACION SECUNDARIA

La filtración secundaria completa un paso fino de colección que las bolsas o filtros de cartucho usualmente realizan. Estos medios de filtros primarios van a colectar polvos y otras partículas bajo diámetros de partículas menores a 0.5 μ , a eficiencias del 99.999% y mucho mejor dependiendo de la cubierta de polvo.

La filtración secundaria es un requerimiento en el crecimiento de los sistemas de colección de polvo para encarar siempre los fuertes límites de emisiones a la salida de la atmósfera. Haciendo retornar el aire al interior de la planta o para procesos que usan y limpian cuartos por abastecimiento de aire, estos tienen la necesidad de incrementar su capacidad de filtración con filtros secundarios para mejor colección de finos. La filtración secundaria es un incremento en la industria para alcanzar separación de partículas finas y con provisión para una limpieza en línea y rendimiento continuo.

Esta filtración secundaria está completada con bolsas y filtros colectores de cartucho que siguen a continuación de los precipitadores, scrubbers y filtros primarios.

a. HEPA (High Efficiency Particulate Air) : Son filtros para partículas de aire de alta eficiencia y los más comunes en los filtros secundarios. Este debe capturar un mínimo de 99.97 % de partículas contaminantes en el aire abajo de 0.3 um de medida de la partícula y son disponibles para colectar hasta un porcentaje superior al 99.99 %. La razón de velocidad es medida a una caída de presión de 12.7 mm de columna de agua, pero son operados a velocidades superiores a 1.4 m /s., con una resistencia inicial de limpieza de 25 mm de columna de agua.

b. ULPA (Ultralow Penetration Air Filters): Los filtros de penetración extremadamente bajos son capaces de proveer un mínimo de eficiencia de 99.99 % (0.001% de penetración) en 0.3 um de diámetro de partículas. Estos filtros operan a velocidades superiores a 1.4 m / s con una resistencia inicial de 25 mm de columna de agua. Algunos filtros ULPA son fabricados a una eficiencia de hasta 99.9995% en partículas tan pequeñas como 0.12 um de diámetro de partícula.

1.3 DISEÑO DE FORMA Y ALTERNATIVAS DE SOLUCION

A medida que las normas de contaminación ambiental son más estrictas, las industrias se han dado cuenta que no existe una solución simple para el control de emisiones contaminantes del medio ambiente, de esta manera las plantas industriales continuamente han buscado mecanismos de control para estar dentro de las normas que exige la sociedad por medio del desarrollo de programas de mantenimiento y de manejo de operaciones de sus materias primas en los procesos de elaboración de sus productos.

Los contaminantes del aire se clasifican en general, como gases, vapores y materia particulada, siendo estos últimos de nuestro interés en el diseño del separador mecánico de polvo con que mejores beneficios se obtengan para la recolección del contaminante ambiental.

Los separadores mecánicos de polvo para separación del producto y recolección son montados directamente después del área de contaminación, tomando en cuenta para su selección el diámetro de la partícula en suspensión, la velocidad del medio en que viaja la partícula, facilidad de mantenimiento en la limpieza, temperatura del aire de transporte y capacidad de recolección de polvo que una vez analizado todos estos factores se procederá a efectuar la correcta selección del equipo.

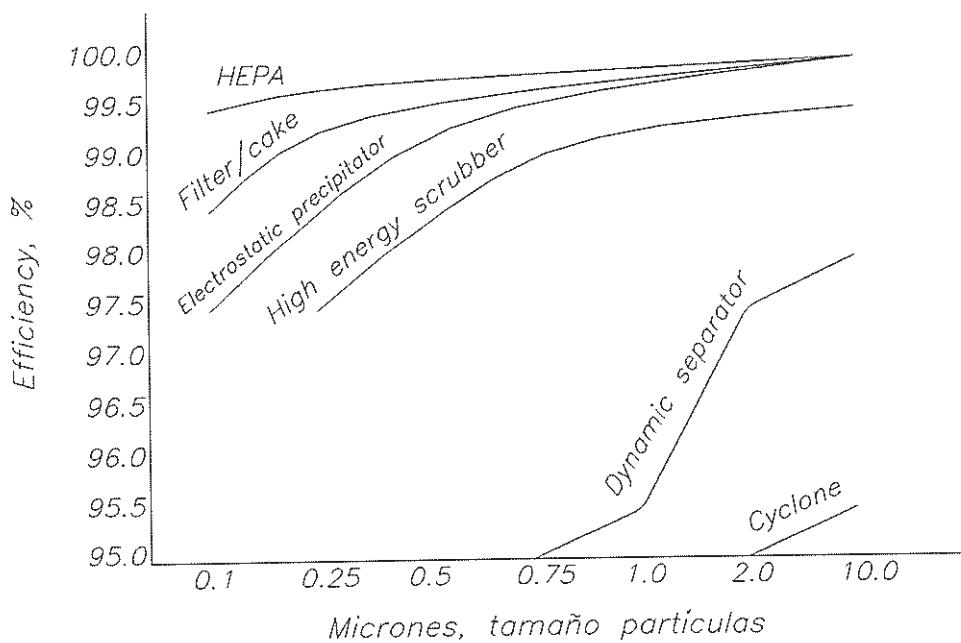


Figura 1.6 Eficiencia de colección versus diámetro de partícula por tipo de colector

A continuación realizaremos una selección del equipo de control de la polución que se ajuste a nuestras necesidades de acuerdo a los tres equipos más usados, ciclón, colector de bolsas y filtro electroestático.

tipo de colector	diámetro de partícula um	eficiencia %	caída de presión mm H ₂ O	mantenibilidad	temperatura ° C	costos \$
ciclón	10 - 45	80 - 95	50 - 75	simple	400	\$
electrofiltro	0.1 - 5	97 - 98	50 - 75	constante	475	\$\$\$\$
filtro de mangas	0 - 5	99.5	80 - 120	atención moderada	280	\$\$\$

Tabla I Matriz de decisión para la selección del equipo colector de polvo a desarrollarse en este proyecto

De lo anteriormente expuesto los procesos industriales actualmente se encuentran enfocados a la disminución de gastos en sus operaciones, sin excluir de ninguna manera la eficiencia de los mismos, es así que de los tres colectores de polvo descritos indudablemente que los filtros de mangas son los que menor costo de construcción y puesta en marcha involucra conservando una alta eficiencia semejantes a las otras dos opciones, siendo a continuación motivo de un análisis más detallado en el tipo de filtro de mangas más idóneo para la solución de nuestro problema, comenzaremos a describir las características principales que involucran a nuestro diseño:

a. Tamaño de las partículas. Un análisis de partículas es la principal característica a considerarse en el diseño de un filtro de mangas, puesto que puede beneficiar la operación del colector por medio de proporcionar una información sobre el tamaño, forma, masa, volumen y distribución de las partículas varias, en el flujo de aire.

La distribución de la partícula está relacionada muy estrechamente con el tamaño de la misma, ya que una capa de polvo eficiente debe ser compuesta uniformemente de

partículas de varios tamaños y formas para lograr la máxima porosidad. De esta manera demasiadas partículas finas pueden crear una capa de polvo demasiado densa y pueden penetrar la tela causando emisiones, siendo este parámetro una gran ayuda en la selección del material de filtración adecuado para el polvo que se desea recolectar.

b. Velocidad del medio de transporte. El fluido de transporte para los colectores mecánicos de polvo es el aire, el cual es generado por un ventilador centrífugo que si se encuentra antes de la entrada al colector el sistema es positivo y si en cambio se encuentra después del colector es un sistema negativo (80 % de los colectores son sistemas negativos).

Esta es otra característica impresindible en el diseño de un filtro de mangas colector de polvo puesto que es un sistema que maneja partículas, si un diseño de velocidad mínima es requerida puede producir sedimentación y posterior taponamiento de la línea de transporte del material contaminante o recuperado y de otra forma una velocidad excesiva de aire puede causar abrasión rápida de los ductos de conducción, por lo que las velocidades mínimas de diseño son más altas que los valores teóricos y aún mayor que las experimentales.

c. Fácilidad de mantenimiento. La eficiencia de estos colectores se basan en el mantenimiento periódico preventivo que se da a las bolsas colectoras o mangas puesto que pueden reducir significativamente niveles inaceptables de emisiones, interrupciones imprevistas en el proceso, y costos innecesarios de partes y mano de obra, es de esta manera que los filtros de mangas pueden ser de limpieza manual, limpieza continua y limpieza semicontínua, dependiendo claro esta del tipo de proceso si es continuo o si es realizado por batches.

d. Temperatura en el aire de transporte. Generalmente las fallas térmicas en bolsas ocurren cuando las fibras de la tela son sometidas a temperaturas más altas que



BIBLIOTECA
CENTRAL

los límites permisibles en su conformación. La temperatura de operación excesivamente alta reduce la resistencia de la tela y causan la contracción de las fibras, distorsionando la forma o la longitud de la bolsa, así como la densidad y permeabilidad de la tela, resistencia a la abrasión y resistencia a ataques químicos.

e. Capacidad de recolección de polvo. Depende directamente del diseñador, puesto que las dimensiones del filtro se relacionan con la producción de partículas contaminantes en el medio ambiente a colectarse, es así que tiene que ver con el factor de filtración de la tela filtrante a utilizarse, dando como resultado el número de bolsas colectoras necesarias, longitud y diámetro de las bolsas y el sistema de limpieza para transporte del material contaminante recuperado.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 PRINCIPIOS DE TRANSPORTE NEUMATICO EN DUCTOS

Los transportadores neumáticos transportan todo tipo de material seco, granulado, de libre circulación en suspensión dentro de un tubo o conducto, por medio de una corriente de aire con alta velocidad o por la energía de expansión de aire comprimido dentro de una columna de densidad comparativa de material fluidificado o aireado, en otras palabras significa llevar y transportar sólidos usando las fuerzas del medio transportador que son el arrastre y la presión. Los usos principales son:

1. recolección de polvo
2. transporte de materiales suaves, como granos, alimentos secos (harina y alimentos para animales), productos químicos (sosa comercial, cal, panes de sal), astillas de madera, negro de humo y serrín
3. transporte de materiales duros, como ceniza volátil, cemento, minerales silíceos y fosfato. La necesidad de procesar nódulos de plástico, polvos y harinas transportados a granel, en condiciones exentas de contaminación ha aumentado el uso de los transportadores neumáticos.

A. Recolección de polvos.

Todos los tubos deben ser lo más rectos y cortos que se pueda y las curvas, si son necesarias, deben tener un radio, de cuando menos, dos y medio a tres diámetros del tubo. Los tubos deben tener dimensiones para tener bajas pérdidas por fricción y mantener velocidades de aire que eviten el asentamiento del material. Se deben disponer aberturas para limpieza frecuente. Las conexiones de los ramales deben entrar por los lados de la tubería principal y entregar su corriente de entrada lo más

cerca posible en la dirección de circulación de la corriente principal. Se deben evitar cambios bruscos en el diámetro para evitar pérdidas por corrientes de remolino. Cuando los recorridos verticales son cortos en proporción a los horizontales, el diámetro del tubo elevador se restringe localmente, con lo cual se aumenta la velocidad del aire y se produce suficiente potencia para elevar el material. Si los tubos verticales son un tanto largos, no se restringen, pero la potencia elevadora necesaria se consigue con el incremento de la velocidad y la succión en todo el sistema.

La superficie del tubo principal en cualquier punto debe ser de 20 a 25 % mayor que las sumas de las áreas de los ramales que entran en él, entre el punto en cuestión y el extremo muerto del tubo principal. Si las barredoras o aspiradoras para piso están equipadas con compuertas eficientes para tiro inducido, no hay que incluirlos en el cálculo del área de la sección principal. El diámetro de la tubería principal y la succión o aspiración requerida en cada campana se determinan por la experiencia. La suma de los volúmenes de cada ramal da el volumen total que debe mover el ventilador.

B. Succión por ventilador

La resistencia que debe vencer el ventilador está compuesta por:

- succiones de diferentes tipos de extracciones localizadas
- pérdidas en el colector (si es recuperación de polvos)
- pérdidas por fricción en las tuberías

Como anotamos anteriormente el traslado neumático se debe a fuerzas de arrastre y a fuerzas de presión. Las fuerzas de arrastre F_d , de una partícula sólida en un fluido es proporcional a la densidad de éste, la sección transversal de la partícula sólida, A_t , y el cuadrado de la velocidad relativa del fluido (diferencia entre las velocidades del fluido y la velocidad del sólido $V_f - V_s$). El coeficiente de arrastre C_d es un factor de proporcionalidad y es una función del número de Reynolds:

$$F_d = \frac{C_d * Re_s * \rho_a * 4}{2 * (V_a - V_s)^2 * \rho_p^2} \quad (1)$$

El coeficiente de arrastre se lo puede obtener con una buena aproximación con la siguiente expresión:

$$C_d = \frac{24}{Re_s} + \frac{4}{(Re_s)^{1/2}} + 0.4 \quad (2)$$

El coeficiente de arrastre, C_d , para una partícula con bordes afilados es comparativamente independiente del número de Reynolds y tiene valores cercanos a 1.0. El coeficiente de arrastre para cuerpos redondos, como esferas y cilindros largos varía con el número de Reynolds, pero, para típicas aplicaciones de transporte neumático, un valor de 0.5 para esferas y 1.0 para cilindros pueden usualmente ser justificados.

2.2 FLUJO DE DOS FASES

Para el flujo de gases y sólidos por tuberías horizontales, existen varias formas posibles dependiendo de la densidad de los sólidos, la razón del índice de peso de sólidos a gas (carga) y la velocidad de este último. Cuando se trata de sólidos de baja densidad o índices bajos de sólidos a gas, y altas velocidades de gas, los sólidos suelen estar completamente suspendidos y dispersos de una manera más o menos uniforme en la sección transversal de la tubería; con razones reducidas de sólidos a gas y a bajas velocidades de gas, los sólidos tienden a rebotar sobre la base de la tubería y formar dunas, en donde las partículas van de duna en duna o bien, forman trozos, dependiendo de la naturaleza de las partículas. No hay ninguna correlación simple que permita predecir la velocidad mínima de acarreo o arrastre para todas las relaciones sólido a gas

sólido a gas en tuberías horizontales. No obstante, se cuenta con algunas guías para estimar las velocidades de acarreo. En el caso de relaciones bajas del índice de peso entre sólidos y gas, por ejemplo el que se emplea en la transportación neumática convencional, la velocidad mínima de acarreo se calcula aplicando la siguiente ecuación propuesta por Dalla Valle, basada en pruebas de tranportación con partículas cuyo tamaño era menor que 0.00812 m y con densidades inferiores a 2646.56 kg/m³, utilizando aire como gas portador:

$$V_{c,h} = 270 \frac{\rho_s}{\rho_s + 62.3} D_s^{0.40} \quad (3)$$

$$V_{c,v} = 910 \frac{\rho_s}{\rho_{ss} + 62.3} D_s^{0.6} \quad (4)$$

En la práctica, las velocidades reales de transportación utilizadas en sistemas con relación baja de índice de peso entre sólidos y gas (<10), es decir, los transportadores neumáticos convencionales, son generalmente mayores que 15.24 m/s (50 pies/s). Para relaciones altas en índice de peso entre sólidos a gas (>20), las velocidades verdaderas del gas que se utilizan son generalmente menores que 7.62 m/s (25 pies/s) y son aproximadamente iguales al doble de las verdaderas velocidades de los sólidos. La caída de presión total en una tubería horizontal se considera como la suma de las siguientes caídas de presión individuales:

A. Para acelerar el gas a la velocidad de transporte

$$\Delta P_{a,G} = \frac{G_G V_G}{2 g_c} \quad (5)$$

B. Para acelerar las partículas sólidas

$$\Delta P_{a,s} = \frac{G_s V_s}{g_c} \quad (6)$$

C. Para la fricción entre el gas y la pared de la tubería

$$\Delta P_{f,G} = \frac{4 f_G L \rho_{dG} V_G^2}{2 g_c D_t} \quad (7)$$

$$\Delta P_{f,G} = \frac{4 f_G L G_G V_G}{2 g_c D_t} \quad (8)$$

D. Para la fricción combinada entre las partículas y la pared de la tubería, entre el gas y las partículas, y entre éstas mismas, suponiendo que dicha fricción se puede expresar por medio de un tipo de ecuación de factor de fricción,

$$\Delta P_{f,s} = \frac{4 f_s L d_s V_s^2}{2 g_c D_t} \quad (9)$$

$$\Delta P_{f,s} = \frac{4 f_s L G_s V_s}{2 g_c D_t} \quad (10)$$

El factor de fricción f_s , se relaciona con el coeficiente de arrastre de las partículas mediante un balance de fuerzas ejercidas sobre las partículas dentro de las tubería, como se indica a continuación:

$$4 f_s = \frac{3 \rho_G D_t C_d}{2 \rho_{ds} D_s} \frac{V_G - V_s}{V_s}^2 \quad (11)$$

La velocidad promedio real del aire se determina por medio de la pérdida de velocidad debida al resbalamiento entre el aire y los sólidos. Wen y Simons encontraron que:

$$V_a = 2 V_s \quad (12)$$

El gasto del aire está expresado por:

$$G_a = \rho_{da} V_a \quad (13)$$

en donde:

$$\rho_{da} = \frac{\rho_a}{\rho_s} (s - ds) \quad (14)$$

La correlación de la caída de presión, no tiene carácter adimensional usual debido a que sólo se utilizó un gas, a saber, el aire. Su incertidumbre parece ser del orden de $\pm 35\%$, y se requieren investigaciones adicionales para desarrollar una correlación general.

La caída de presión total en una tubería vertical se considera como la suma de las siguientes caídas de presión individuales:

1. Para la aceleración del gas a la velocidad de transporte
2. Para la aceleración de las partículas sólidas
3. Para la fricción entre el gas y la pared de la tubería
4. Para la fricción combinada entre las partículas y la pared de la tubería, y cualquier otra semejante
5. Para el soporte de la columna de gas,

$$\Delta P_{h,G} = \frac{G_G g L}{V_G g_c} \quad (15)$$

6. Para el soporte de sólidos.

$$\Delta P_{h,s} = \frac{G_G g L}{V_s g_c} \quad (16)$$

2.3 TEORIA DE FILTRACION

La filtración puede ser definida como un método seco de colección de partículas en cual un arreglo de muchos centros individuales son ensamblados dentro de una estructura porosa a través del cual un gas o fluido contaminado es pasado. En proceso de colección, las partículas tocan a otras partículas ya colectadas previamente y un depósito es edificado el cual puede llegar así mismo el medio de colección principal.

El polvo coleccionado debe eventualmente ser removido de alguna manera o impedirá el flujo de gas a un grado intolerable. La filtración es por lo tanto un repetitivo proceso cíclico de colección y limpieza. Hay básicamente tres tipos de arreglos empleados:

- fibra individual, empacada ligeramente dentro de un cojin a manera de almohada

- material granular, en cualquier mezcla, movimiento o arreglo fluidizado
- fibras tejidas o no tejidas, dentro de una tela la cual es usada en la forma de una bolsa

Todas ellas son capaces de alcanzar eficiencias muy altas de colección con caídas razonables de presión en el tiempo de limpieza. La filtración es por lo tanto usada para colectar partículas muy finas bajo condiciones secas. La principal limitación a su aplicación descansa en la naturaleza de el material el cual puede ser usado para la construcción de las fibras o gránulos. Para fibras filtrantes o telas filtrantes una gran variedad de fibras naturales y sintéticas son disponibles. Es necesario seleccionar una la cual va a tener una larga vida agradable a un costo razonable bajo las condiciones prevalecientes en la entrega del problema. Todos los mecanismos de colección de partículas involucran una fuerza aplicada. La más simple es la fuerza gravitacional.

Esto es suficiente, la fuerza centrífuga puede ser ejecutada en las partículas. En la filtración, tres efectos separados pero a la vez todas las fuerzas relacionadas están involucradas :

- impactación
- intercepción
- difusión

a. Impactación

Ocurre si una partícula es tan larga y con mucha inercia que no puede seguir la linea de corriente del gas alrededor de la fibra y impacta en su superficie. Este mecanismo involucra una colisión de la partícula de la fibra. Observando datos experimentales aparece que las más grandes eficiencias de impactación de colección es obtenida cuando el medio del filtro es compuesta de las fibras más finas posibles consistente con la caída de presión disponible.

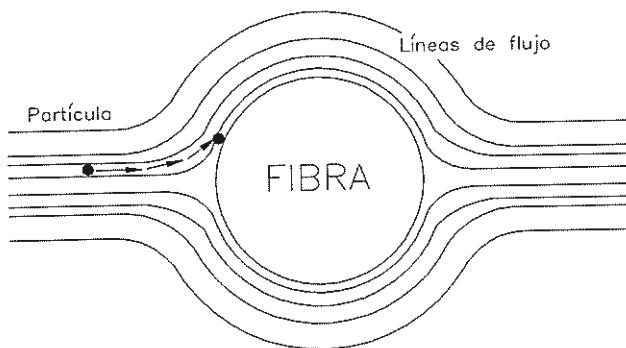


Figura 2.1 Mecanismo de captura de la partícula por impactación

b. Intercepción.

Es un mecanismo de colección en el cual la partícula es ligeramente más pequeña que aquellas que impactan directamente en las fibras. Las partículas más pequeñas comienzan a seguir las líneas de corriente alrededor de la fibra, pero ellas son tan largas y tienen también mucho momentum. Como resultado las partículas no pueden permanecer en las líneas de corriente alrededor de las fibras. Ellas van a tocar ligeramente la superficie o entran a la capa límite láminar que rodea cada elemento de la fibra, perdiendo energía cinética y por lo tanto comienzan a misionarse dentro de las fibras.

Cuando esto ocurre la porosidad del medio filtrante decrece y la verdadera superficie de filtración comienza a formarse. La construcción porosa puede ser completada rápidamente si el radio del diámetro del poro al diámetro de la partícula es > 10 . Si el radio es > 10 , una considerable fuga puede ocurrir. El mecanismo de impacto y intercepción usualmente contabilizan el 99.99% de colección de partículas más largas que una micra



BIBLIOTECA
CENTRAL

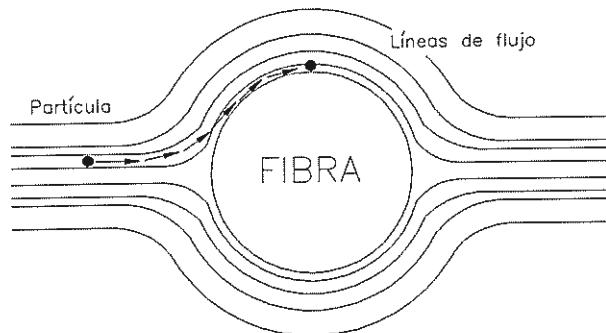


Figura 2.2 Mecanismo de captura de la partícula por intercepción

c. Difusión.

Es generalmente efectivo para partículas bajo una micra en diámetros aerodinámicos.

Muchas tecnologías de Control de la contaminación del aire consideran que la difusión es inconsistente para partículas con diámetros más largos que 0.1 micra el cuál es el rango de movimiento Browniano. En esta situación las partículas son tan pequeñas que su movimiento individual puede ser afectado por colisiones en una molécula o nivel atómico. La colección de esas partículas finas es un resultado de falta de movimiento.

Para partículas muy pequeñas, la dependencia en los mecanismos de impactación requiere el uso de velocidades de filtración indeseable económicamente. En esa situación, un volumen de gas más bajo para el área de filtración es requerida para maximizar la colección de partículas muy finas por intercepción y difusión. En el comercio esto es llamado radio de tela - aire más pequeño.

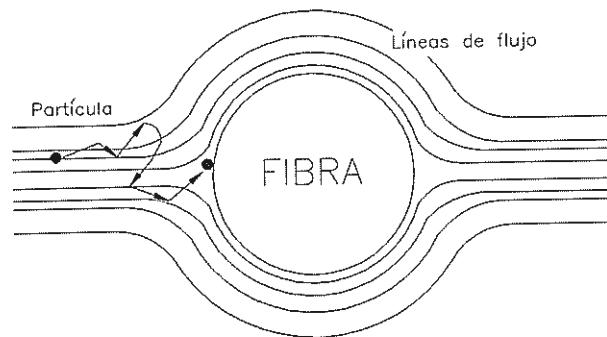


Figura 2.3 Mecanismo de captura de la partícula por difusión

El medio del filtro puede ser una fibra flexible, membrana, superficie de revestimiento o algún compuesto de esos, alternativamente este puede ser un cartucho rígido poroso o una espuma de papel, filtro, plástico, cerámico o metal sinterizado, dando lugar a otras formas o mecanismos de filtración como:

- a. Tamizado: retiene muchas partículas de medida más largas que las aberturas entre los elementos de la fibra, semejante a un cedazo o abrigo.
- b. Gravitación: asentamiento de partículas en el medio filtrante o disipador interior bajo la tolva
- c. Electrostático: es la atracción que puede subir o puede estar almacenada intencionalmente, entre el polvo y el filtro para atraer partículas hacia el interior del filtro o coraza de polvo, causa aglomeración de la partícula y mejorar la limpiabilidad del filtro.

d. Cubierta de polvo filtrante: Manipula partículas de polvo que se codifican en la superficie superior del filtro, provee un tejido más grueso o "cama" y un camino más fino de flujo que el mismo medio. Esa retención de la cubierta de fibra provee para la colección de partículas más finas, reducción de penetración de finos hacia el interior de la fibra y usualmente caída de presión más baja a través de la fibra. Por lo tanto, la limpieza del filtro puede necesitar ser temporizada en un arranque inicial o debería ser menos agresiva y menos frecuente para permitir la retención de una capa óptima de espesor de polvo en todo el tiempo.

e. Capa adicional de flujo: una capa intencional del polvo del proceso o polvo adicional que fluye mutuamente por los poros es edificado en la superficie superior del filtro inicialmente y / o durante la operación en que se desea la capa de polvo. Esta felpa o capa de polvo va a filtrar partículas más finas, reduciendo la penetración de finos dentro del medio de la fibra y reduciendo la caída de presión a través de la fibra

2.3.1 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL FILTRO RECOLECTOR DE PARTICULAS

Los siguientes factores de diseño ingenieriles son los básicos en el diseño de un sistema de control:

1. Restricciones de espacio podrían prevenir la filtración como un dispositivo de control
2. El método de limpieza del polvo del filtro de mangas. Este puede ser por sacudido, aire reverso o pulse-jet.
3. La decisión de usar un sistema de precisión positiva o negativa. Si el polvo es tóxico, un sistema de presión negativa es requerida. Los sistemas de presión negativa en el control de contaminación del aire normalmente operan a una presión absoluta de media atmósfera. Los sistemas de presión positiva pueden operar a 200 psig o más altas.

presión absoluta de media atmósfera. Los sistemas de presión positiva pueden operar a 200 psig o más altas.

4. La construcción del mismo sistema de fibras filtrantes. El controlador será fabricado como una estructura, panel o sistema modular ?. Los filtros de mangas son usualmente construídos en unidades modulares o compartimentos empernados juntos y colocados los ductos en el sitio superior de los efluentes del proceso.
5. Los tipos de fibras
6. El radio de aire - tela
7. El gas necesario de enfriamiento o precondicionamiento
8. Fácilidad de mantenimiento. Los accesos a las bolsas es necesario para el reemplazo cuando las fugas ocurren. Los accesos a los direccionadores controlaran el flujo entre los compartimientos, esto es necesario para el balanceamiento del flujo del sistema y para colocar un compartimiento fuera de servicio por reparación. El acceso fácil, facilita el manejo de materiales, el cual el desalojamiento del fondo de la tolva del comportamiento debe ser provisto en caso de mal funcionamiento de los mecanismos de descarga.

Otros puntos de acceso son necesarios para facilitar mediciones de la efectividad del sistema de control de la polución. Otros problemas de mantenimiento son asociados con sistemas de presión negativa y mecanismos de sacudimiento de bolsas.

9. El problema de emisión de captura. El gas contaminado debe ser confinado al lugar de generación y encaminado al colector, en este caso, un filtro de mangas. La emisión de captura puede ser acompañada por tres tipos de campanas: remota, de recibimiento y encerramiento (en orden al incremento de efectividad).

El ducto de trabajo envuelto debe ser cuidadosamente diseñado hacia el largo de las partículas para evitar asentamiento en muchos tramos. Si más tarde el

flujo fuera incrementado temporalmente en el ducto de trabajo, los flujos de gas de alta concentración de partículas será a través del sistema como un resultado de depósitos reentrantes en curvas y codos. Los ventiladores y motores que mueven el contaminante a través del sistema debe ser también considerado como parte del área general del diseño ingenieril.

10. El equipo de manejo del material. Específicamente involucra aquí los tornillos descargadores, los cuales son normalmente usados para vaciar las tolvas de los compartimientos filtrantes y muchos asociados en cadena o serie de seguridades con el mecanismo de desalojamiento. Una hermetización de aire previene las fugas de un significativo ascenso o aspiración del ambiente del alrededor hacia el fondo de la tolva del filtro evitando una recirculación y reingreso de ese polvo que es estricto o mandatorio para todo sistema de presión negativa.
11. Los efluentes de descarga. Serán los efluentes descargados desde una simple o múltiple etapa.
12. La selección de los controles eléctricos requeridos para operar el sistema del filtro. Los controles eléctricos son usados para operar los sistemas de limpieza. El ciclo de limpieza tiene una cadena de seguridad electromecánica al igual que su iniciación es activada en muchos casos por la caída de presión.

Alternativamente un ciclo simple temporizado puede ser satisfactorio. Algunas veces ambos pueden ser necesarios. Un sistema de control eléctrico es usado para operar los desviadores para la selección cíclica de los compartimientos de los filtros de mangas en su secuencia de limpieza. Si el mecanismo de limpieza involucra pulso a chorro o chorro reverso de aire en un compartimiento simple, los ciclos temporizadores eléctricos de los chorros de aire son de columna a columna. Para chorros de pulso, el sistema de control involucrará el mecanismo para los anillos más bajos de chorro (venturi) desde el inicio hasta el sello de

la manga. La duración del ciclo de limpieza es gobernada por el sistema de control.

Para una razón de gas constante, el fijo incremento en la caída de presión a través del sistema correcto al depósito de polvo en las mangas van a requerir un ciclo de operación del motor al igual que la fuerzas aplicadas al gas será firmemente incrementada dentro de los intervalos de limpieza. La velocidad del ventilador demuestra decrecer durante el período de reparación de la capa para prevenir una excesiva penetración de la partícula y entonces se producen velocidades bajas a altas en forma repetitivas durante el período de filtración efectiva. Un conductor de velocidad variable en el ventilador, grabado para un ciclo regular podría minimizar el consumo total de poder. Otros tipos de equipo el cual necesita ser controlados son mecanismos de sacudimiento

De los anteriores factores de diseño, el principal criterio es la razón de flujo de gas, medidos en pies cúbicos actuales/minuto. El volumen a ser tratado es preparado por el proceso, pero la velocidad de filtración o air-to-cloth ratio es superior a ella. La velocidad depende de siete ítems:

1. La carga de polvo que tendrá una mayor influencia en la razón aire - tela
2. El tipo, característica de la forma y densidad del polvo influye en la selección de las fibras de los filtros para servicio de partículas finas en que necesariamente las partículas van a tener una mayor penetración más alta que las partículas largas y gruesas del mismo diámetro.
3. El tipo de fibra
4. La construcción de la fibra
5. Los métodos de limpieza también afectan a la razón aire / tela, con métodos de limpieza más severo (alta caída de presión), un razón aire/tela más alto puede ser usado porque la bolsa puede ser adecuadamente limpiada.

6. El ascenso del flexionamiento y crecimiento de la bolsa como resultado de la limpieza con una alta relación de aire / tela, es producido por una limpieza más frecuente, la cual causa más flexibilidad y plegabilidad de las bolsas con mayor probabilidad de gasto
7. La fracción de bolsas filtrantes, las cuales están fuera de servicio en muchas ocasiones por fugas

El segundo mayor criterio de diseño es la razón del tiempo de filtración al tiempo de limpieza, los intervalos entre sucesivas limpiezas de compartimentos pueden abarcar desde segundos a muchos minutos. El ciclo de limpieza puede durar desde muchos minutos a algunas horas. La razón del ciclo de limpieza al período de limpieza mide el porcentaje de el tiempo que el filtro es ejecutado efectivamente. Esta razón demuestra estar en un mínimo de 10 : 1 o más grande si es posible.

El tercer mayor criterio de diseño es el requerimiento del polvo. La caída de presión puede ser reducida minimizando el arrastre residual, Cr , el cual es altamente dependiente de la permeabilidad del medio filtrante. La permeabilidad es una función del tipo de fibra, la construcción del tejido y muchos tratamientos que han sido aplicados al tejido terminado. Secundariamente, el área puede ser incrementada por lo tanto reduciendo la razón aire/tela. La reducción de la velocidad de filtración reduce las pérdidas de fricción por turbulencia y parte de las pérdidas por fricción viscosa.

2.3.2 CAPACIDAD DE FILTRACION

La capacidad de filtración básicamente se relaciona con los parámetros de dimensionamiento del filtro de bolsas, para lo cual es importante:

a. Volumen del Proceso

Determina el volumen de corriente de aire mínimo y máximo y la capacidad de

carga de polvo necesaria por volumen o peso. Usualmente se lo determina correctamente para los niveles de operación del proyecto. Otra base frecuente para el dimensionamiento es el volumen estimado de aire necesario para capturar la carga de polvo esperada en todos los dispositivos de la planta. Este volumen puede ser calculado desde la acumulación del volumen de aire que manejan campanas de captura individual y de ductos de entrada al sistema requerido.

b. Velocidad de filtración V_f (radio de aire / tela, A/C). Este parámetro es crítico para el dimensionamiento del filtro colector y por lo tanto para su rendimiento. Los datos básicos están derivados desde pruebas para nuevos productos de polvo, a la experiencia pasada en polvos similares y aplicaciones de medios filtrantes y de esta manera una velocidad de filtración preliminar puede ser seleccionada. Esto es usualmente enunciado como la relación de aire a tela en ft^3/min por ft^2 ó en m^3/h por m^2 , el cual es reducido a ft/min ó a m/s de velocidad de filtración. Las velocidades de operación típicas de filtración en aplicaciones industriales pueden tener rangos de 0.01 a 0.04 m/s (2 a 8 ft/min) con un máximo superior hasta de 0.076 m/s (15 ft/min). La caída de presión o resistencia del material del filtro limpio es medido a 10 ó 12.7 mm de H_2O (0.5 pulgadas de columna de agua) para la permeabilidad standard ASTM de volumen de aire en m^3/h por m^2 .

c. Dimensionamiento del área filtrante

El Volumen de corriente de aire o del gas Q en m^3/h (ft^3/min) dividida para la velocidad de filtración V_f en m/s (ft/min) determina el área filtrante requerida en m^2 (ft^2):

$$\frac{Q}{V_f} = \frac{\text{Volumen de aire}}{\text{Velocidad de filtración}} = \frac{\text{Area filtrante}}{(17)}$$

Existen tablas nominales de velocidades de filtración para materiales de polvos

seleccionados para, limpiezas por sacudimiento a baja presión o limpieza de aire reverso y limpieza por aire comprimido pulse jet para alta presión. Estos usualmente van desde 0.01 a 0.076 m /s por m² (2 a 15 ft/min por ft²). Antes de seleccionar y calcular las dimensiones del colector, algunos otros factores deben de considerarse dentro de la evaluación del diseño, por lo tanto, la velocidad de filtración efectiva es igual a la velocidad de filtración nominal multiplicada por factores de aplicación, temperatura, diámetro de partícula y carga de polvo.

Material	baja presión	alta presión
	(ft / min)	(ft / min)
Polvo abrasivo	3.0	10.0
Carbón activado	2.0	6.0
Alúmina	2.5	8.0
Asbestos	3.0	8.0
Calcio	2.0	6.0
Cemento	2.5	8.0
Polvo epóxico	2.0	8.0
Fibra de vidrio	2.5	8.0
Granito	3.0	10.0
Grafito	2.0	5.0
Mica	2.7	9.0
Leche en polvo	4.0	8.0
Plástico en polvo	2.5	7.0
Polvo refractario	3.0	9.0
Polvo del caucho	3.0	9.0
Sales	3.0	9.0
Arena	2.5	10.0
Silica	2.5	8.0
Jabón detergente	2.0	8.0
Talco	2.5	9.0

Tabla II Velocidad de filtración recomendada para cada tipo de material
según el sistema de limpieza en el diseño (ref. 3)

$$V_{ef} = V_{fn} * A * T * P * D, \quad (18)$$

A	aplicación	0.8	Aceite, húmedo o aglomerado
		0.9	Colección de Producto
		1.0	Colección de Polvo fastidioso
T	temperatura	1.0	Superior a 43° C (110° F)
		0.9	Desde 43 a 107° C (225° F)
		0.8	Abajo de 107° C (225° F)
P	tamaño particula	0.8	Bajo 3.0 micras
		0.9	Desde 3 a 9 "
		1.0	De 10 a 50 "
		1.1	De 51 a 100 "
		1.2	Arriba de 100 "
D	carga de polvo	1.2	Para 10 o menos gr/ft ³
		1.1	Para 10 a 20 "
		1.0	Para 20 a 50 "
		0.9	Para 50 a 80 "
		0.8	Arriba de 80 "

d. Velocidad de pasadizo del filtro

La velocidad de la corriente de aire entrando en el área del pasadizo entre los filtros, usualmente es llamada Velocidad de pasadizo V_c , mucho mejor conocida como velocidad de CAM del filtro colector.

Esto describe más exactamente la función del flujo involucrado el cual es la velocidad de la corriente de aire pasando alrededor del filtro. Un tope promedio de 350 ft/min es usual aceptar en la práctica. La velocidad de pazadizo es

usualmente un flujo de aire vertical hacia arriba en los colectores del filtro que son limpiados en línea, al igual esto debe ser limitado a una velocidad que no reingresará las partículas de polvo que han sido limpiadas. Estas partículas caen fuera por gravedad, en otras palabras el polvo colectado debe ser posible descender fuera a través del flujo descendente durante la limpieza del filtro.

Si el polvo fino no puede caer fuera, será conducido de regreso a la superficie del filtro o reingresado. Este es un problema en filtros altos donde los finos son retenidos en la parte superior de la manga de altura indefinida. El área es efectivamente limpia y así es posible reducir la filtración, lo que produce que la velocidad de filtración se incremente la cual nuevamente aumenta la caída de presión a través del filtro.

Los filtros colectores que son programados para limpiar un compartimento o una porción del colector total fuera de funcionamiento en un cierto tiempo de operación demuestra no experimentar los problemas de reingreso. En este caso el flujo ascendente es parado durante la limpieza de cada compartimento, al igual que el polvo es libre para descender. Un temporizador secuencial adelantará el próximo compartimento acorde al ciclo de tiempo programado y así todos los compartimentos son limpiados en secuencia pero sólo uno a la vez. Esto es una práctica común en colectores largos de sacudimiento o aire reverso y algunos colectores pulse-jet.

e. Caída de presión

La caída de presión o resistencia en un filtro colector es primeramente relacionada al nivel de los factores siguientes:

- Velocidad de Filtración V_f , o A / C radio
- Medio filtrante seleccionado
- Carga o manejo de polvo en la corriente de aire

- Polvos finos y características
- Velocidad de pasadizo o V_c
- Efectividad de la limpieza del filtro, o como cierra el proceso de limpieza para llegar a una nueva condición filtrante.
- Subida o Ascenso y porosidad de la coraza del polvo retenido en fibras
- La pérdida mecánica o caída de presión a través del filtro colector encerrada y los diseños de entrada y salida
- Las características de arrastre del filtro S, en pulgadas de agua por pie por minuto o resistencia o caída de presión del medio particular relativo a la velocidad de filtración.

Un flujo más bien viscoso (láminar) que turbulento es el caso en ambos depósitos de polvo como el lecho de polvo en la superficie de las fibras y dentro de la misma fibra. La ley de Darcy se aplica y puede ser expresada como:

$$\frac{-P}{L_m} = K V / g_c \quad (19)$$

Para un sistema de temperatura constante nosotros podríamos definir la caída total de presión como la suma de la caída de presión a través de la capa de polvo más la caída de presión a través del medio o la misma fibra. La caída de presión a través de la capa puede ser expresada a una temperatura constante como:

$$-P = C_r V / g_c \quad (20)$$

Todas esas constantes K y C_r dependen de la velocidad de filtración superficial V y la porosidad e . Una presión constante en el plenum sucio del filtro es asumida. Una nueva fibra tiene una considerable área interfibral la cual es completamente abierta. El espesor de la fibra de la onda es importante al igual que la distancia

interfibral no será más que 10 veces el diámetro aerodinámico del promedio de la partícula que se espera recolectar relacionada por aglomeración o intercepción. Si la partícula es también abierta, la partícula simple no puede unirse a los poros completamente. Una larga capa inicial penetra hacia el interior del medio filtrante y llega ser parte permanente de él. Algunos de estos materiales no es removido por un mecanismo de limpieza, puesto que quedan atrapados, envueltos dentro del medio filtrante que llega ser una parte integral de la fibra. Despues de los primeros ciclos de limpieza la resistencia C_r llega ser establecida correctamente.

Por lo tanto se debe asumir que una presión constante existe en el plenum sucio o de otra forma la ley de Darcy no se mantiene. La caída de presión a través del medio filtrante se incrementa con el tiempo y causa una activación del mecanismo de limpieza. El arrastre en pulgadas de agua es dibujada versus masa de polvo. El C_r es el arrastre residual del medio filtrante limpio. El período donde el arrastre se incrementa exponencialmente hasta una razón constante de incremento es el período en el cual se recobra la capa de polvo.

Despues que las partículas depositadas han sido removidas en el período de limpieza, una cierta considerable penetración, especialmente por partículas finas ocurrirán hasta que la filtración verdadera de la superficie es recobrada. Al final del intervalo de limpieza la caída de presión a través del filtro se ha incrementado hasta el punto donde el ciclo de limpieza es nuevamente iniciado.

La verdadera superficie de filtración no es la misma bolsa, pero si lo es el lecho de polvo en la superficie de la bolsa. La bolsa solamente provee el mecanismo para tamizar partículas gruesas. Tan rápido como el polvo cubre el área intersticial entre las fibras adyacentes como un resultado de impactación o intercepción se incrementa el arrastre rápidamente.

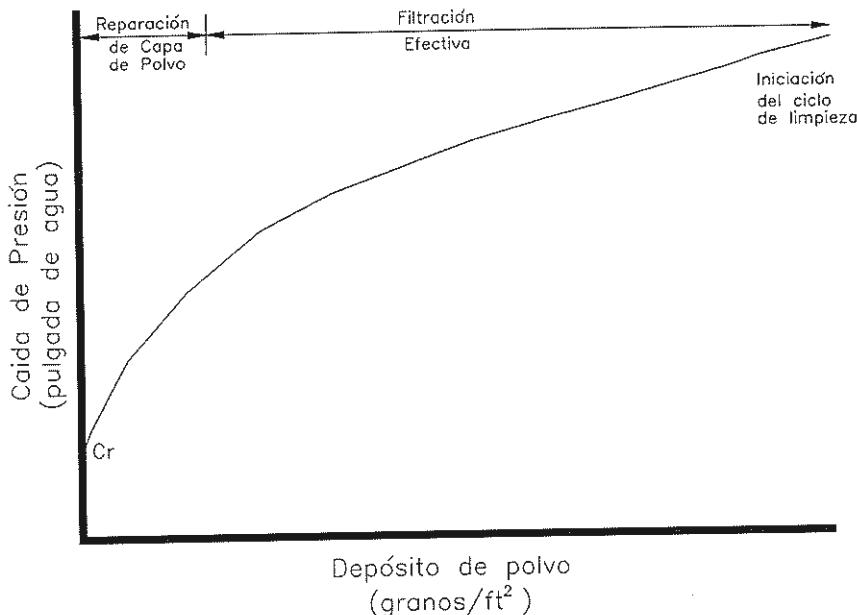


Figura 2. 4 Esquema de curva de rendimiento en un colector de polvo simple

Cuando la verdadera superficie filtrante ha sido restablecida, existe un constante incremento en el arrastre el cual es directamente relacionado a cierta cantidad de polvo depositado, asumiendo que la capa es incompresible. La presión envuelta en control de la polución del aire por la filtración de la fibra no es alta para causar compresión de la capa de polvo para velocidades ordinarias de filtración de 1 - 25 ft/min. La constante K en la ecuación anterior es el recíproco del descenso en la porción efectiva de filtración del ciclo.

El arrastre se incrementa hasta que la caída de presión total alcanza el valor establecido por los sistemas de diseño para activación del ciclo de limpieza. El mecanismo de limpieza opera en un encendido intermitente o básicamente en forma continua, dependiendo del diseño. La caída de presión decrece muy lentamente en el punto inicial. La cubierta de polvo comienza cuando la limpieza cesa y el ciclo se repite.

La punta de la curva de rendimiento puede ser afectada por escogimiento de la fibra. Esta puede ser afectada por la fibra tejida o fibra no tejida y por el tratamiento especial que le ha sido aplicado a la hebra antes o después de la construcción de las bolsas filtrantes, siendo estos factores influyentes en el tiempo de reaparición de la capa de polvo. Esto puede ser drásticamente afectada por la selección del mecanismo de limpieza. Una limpieza pobre incrementará el arrastre residual, una excelente limpieza va a decrecer ciertamente el arrastre residual. El tiempo de filtración efectiva es primariamente una función de la concentración y una pequeña extensión de las propiedades del material el cuál esta siendo colectada.

Afortunadamente existen fórmulas teóricas para calcular la caída de presión a través del filtro colector. Por lo tanto ellos generalmente involucran un factor experimental para el arrastre del filtro S , en pulgadas de agua por pie por minuto, otro coeficiente o factor de resistencia. A menos que esos factores puedan ser determinados exactamente, estos colocan los cálculos correctos en bases empíricas. Los factores deben reflejar las condiciones de operación. Hay una relación directa entre la caída de presión P_c (P) a través del filtro colector y la resistencia al arrastre S a través del medio filtrante en un cierto número de veces la velocidad de filtración V_f a través del medio filtrante. Esta relación es expresada como:

caída de presión = arrastre del filtro * velocidad de filtración

$$\Delta P_c = S * V_f \quad (21)$$

- * arrastre del filtro (S) en pulgadas de agua por pie por minuto, es la resistencia al flujo
- * La velocidad de filtración V_f (razón aire - tela) en pies por minuto es la velocidad de la corriente de aire a través del medio filtrante en las condiciones de operación y diseño.

- * La caída de presión P_c (ΔP) en pulgadas de agua, es la caída de presión total de operación o resistencia a través del filtro colector y si P se incrementa como el producto de la velocidad de filtración por incremento de la resistencia.

f. Selección de la tela

Los dos mayores tipos de telas son el tejido trenzado y el tejido no trenzado. Las telas no tejidas son compuestas de fibras orientadas aleatoriamente, comprimidas dentro de una felpa y necesariamente algunos tejidos flojos posterior al material.

Las telas trenzadas tienen un rango largo definido de patrón repetitivo. Las telas de tipo no trenzado dependen de un menor grado de las fibras trenzadas en los depósitos iniciales de polvo en relación a la colección de partículas finas.

Una sección transversal de una tela no tejida demuestra considerable porosidad en el movimiento de la dirección del fluido. Esos espacios abiertos deben ser llenados por impactación o intercepción, para formar la verdadera superficie de filtración antes de que el tejido pueda realmente capturar una fracción más larga de partículas finas.

Las telas no trenzadas son generalmente de 2 a 3 veces más gruesa que las telas trenzadas. Cada una de las fibras individuales orientadas aleatoriamente actúa como un blanco para la intercepción y impactación. En la sección transversal los espacios entre parejas de fibras pueden ser 10 pliegos más largo que una tela trenzada.

La profundidad de la tela y el decrecimiento de la velocidad de la partícula asociada con la fibra más larga, produce un tortuoso o difícil camino de la partícula de polvo en el flujo de aire, causando que el tejido llegue a ser parcialmente llenado con sólidos. El resultado es una caída de presión a través del medio filtrante. Metódos más severos de limpieza son necesarios para descagar la cubierta del

polvo que son requeridos para las telas trenzadas. Las bolsas no tejidas son usadas para razones más altas de aire / tela, 10:1 ó 15:1 es común. Ellos demuestran no ser usado en servicios especiales de gran humedad si las partículas son higróscopicas por la gran tendencia de impedimento y privación. Un factor importante en la selección de la tela, es su construcción, que involucra muchos factores los cuales afectan el rendimiento de la captura del material como la lanilla que al deshilarse desde la superficie de la fibra terminada mantendrá el polvo lejos desde la masa de la superficie de la tela. Las partículas detenidas serán serán capturadas en lugar del lecho de polvo de la obstrucción de la tela. Ellos pueden ser difícilmente removidas durante el ciclo de limpieza.

Otro actor en la construcción de la tela trenzada la cual afecta la eficiencia de captura es la unión o el entrelazado. El entrelazado de Sateen por ejemplo va sobre uno y bajo tres en ambas direcciones. Un entrelazado simple es sobre-bajo en ambas direcciones. El tejido cruzado es generalmente sobre dos y bajo una pero en una sola dirección.

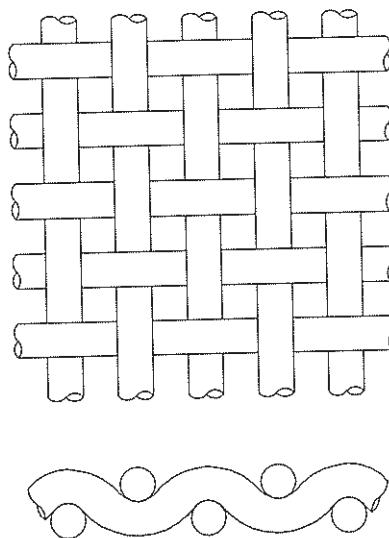


Figura 2.5 Entrelazado simple de la fibra

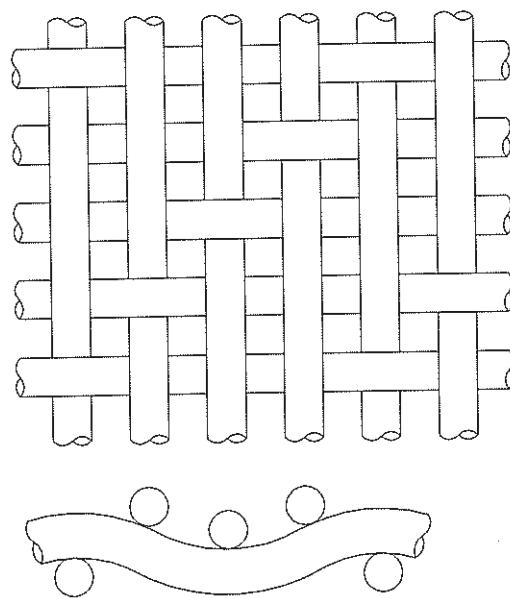


Figura 2. 6 Entrelazamiento de tejido 3 / 1

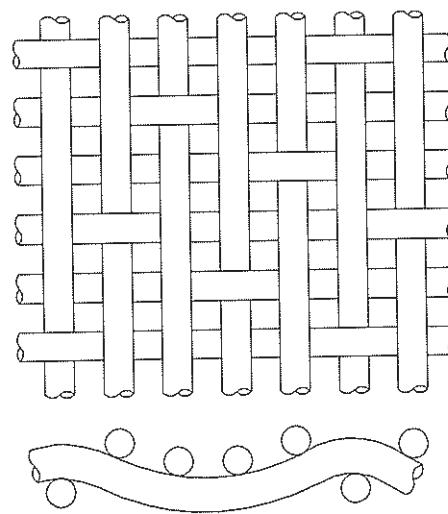


Figura 2.7 Entrelazamiento de tejido tipo sateen

Los diferentes patrones de tejimiento decrecen el área abierta entre las intersecciones de las fibras. Así ellas tienen una situación directa en la permeabilidad de la tela. Las telas son usualmente contruidas con distintas densidades de hilos en el tejar y en todas direcciones. Esta características de diseño afecta a la permeabilidad y a la fortaleza del tejido. Las fibras pueden tener muchas formas: multifilamentos o monofilamentos. Las fibras naturales (algodón, lana) ocurre como una sola hebra. Hebra es un término que tiene relación con la longitud individual de las fibras de las cuales el hilo está hecho. Las fibras sintéticas son producidas en monofilamentos continuos y ellas son cortadas deliberadamente para hacer hebras de varias longitudes para obstrucciones con algodón o lana.

Los tipos de fibras usadas para telas filtrantes van desde un rango de fibras naturales (algodón y lona) hasta las sintéticas (poliéster y nylon) todos ellos en la rama del vidrio y acero inoxidable. Algunas propiedades de fibras comunes son demostradas más adelante. El algodón y la lana tienen límites bajos de temperatura, una resistencia promedio de abrasión y son relativamente caras. Las poliamidas (nylons) generalmente tienen la mejor resistencia a la abrasión pero son limitados 107 ° C - 121 ° C.

En muchas aplicaciones ellas tienen pobre resistencia química. Los acrílicos tienen ligeramente un más alto límite de temperatura que algunas poliamidas. Polyester, como Dacrón, Orlón, etc. son probablemente los de mayor rango usadas de todas las fibras. Ellas tienen buena resistencia a la abrasión y un límite de temperatura cercana a 135 ° C. Nomex® tiene un relativo alto límite de temperatura cerca de 232 ° C, y una buena resistencia a la abrasión. En adición a un muy buen rango de temperatura y una mejor resistencia al fluoride que al vidrio, Nomex® tiene una mejor resistencia a los alrededores acidos y alcalinos que el Nylon en 107 ° C a 121 ° C. Desafortunadamente la resistencia química de

Nomex® decrece con el incremento de la temperatura.

	Polipropileno	Poliéster	Acrílico	Fibra de Vidrio	Nomex	Teflón	Orlón
Max. Temp.	75 °C	135 °C	140 °C	260 °C	190 °C	260 °C	260 °C
Abrasión	Excln.	Excln..	Buena	Media	Excln.	Buena	Buena
Absorción de Energía	Buena	Excln.	Buena	Media	Buena	Excln.	-----
Prop. de Filtración	Buena	Excln.	Buena	Media	Excln.	Media	Buena
Hidrólisis de calor húmedo	Excln.	Pobre	Excln.	Excln.	Buena	Excln.	-----
Resistencia a Alcalinos	Excln.	Media	Media	Meida	Buena	Excln.	Buena
Resistencia a Acids. Minerales	Excln.	Media	Buena	Pobre	Media	Excln.	Excln.
Oxígeno (15%)	Excln.	Excln.	Excln.	Excln.	Excln.	Excln.	Excln.
Costo	\$	\$	\$\$	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$\$\$	\$\$\$

Tabla III Propiedades de las telas filtrantes (ref. 7)

Las Poliámidas como el Nylon y Nomex® son materiales naturalmente cristalinos. Ellos pueden ser trabajados en frío, cerca de 551 MPa (80 000 psig) de esfuerzo tensil para producir muchas coliciones, fibras orientadas direccionalmente las cuales es probable el mejor servicio para abrasivos si la temperatura no es problema severo. Cerca del 85 % Acrylonitrile (Orlon, Acrylan and Crealan) polímeros cristalinos es encarecido durante la extrusión y el hilado el cual provee un incremento del esfuerzo tensil. La fibra de vidrio de seguro tiene los más altos límites de temperatura de todos, 288 °C sin mucho tratamiento de superficie como grafito o recubrimiento de Silicón. La fibra de vidrio debe ser lubricada en alguna forma, al igual que ellas van a deslizarse sobre una o otra sin cortarla o quebrarla en el ciclo de limpieza.

El Acetato de celulosa es comúnmente usado como un recubrimiento de fibras de

vidrio para proveer un resbalón adicional pero a límites superiores de servicio decrece a 121 °C como un resultado. El grafito es usado como un recubrimiento de la superficie para retener el límite de servicio superior de 288 °C - 302 °C con una capacidad de incremento de fibras de vidrio para resbalar uno sobre otro para prevenir roturas. La fibra de vidrio es solo material de la bolsa que no puede ser limpiada por sacudimiento.

Las bolsas de teflón son usadas cuando extrema resistencia química es requerida para los servicios de los alrededores. La fibra es demasiado cara, tiene un muy bajo coeficiente de fricción y no va a tener muchos problemas de doblez y de uso. Cerca de un período largo de tiempo y con limpieza continua, algunas fibras pueden tener una tendencia a hundirse. Dos técnicas son usadas para solucionar este problema potencial. Las bolsas de Teflón pueden ser instaladas de corrido para 24 - 36 horas en temperatura de operación sin presencia de partículas y ellas siempre serán retenidas.

En bases comparativas, la tela con recubrimiento de Teflón tiene preferencia a la estabilidad dimensional a las altas temperaturas donde el Polyester, Acrílicos, Algodón y Lanas son completamente inusuales. El Polipropileno es de tan bajo precio, tiene una alta resistencia tanto a los ácidos como a los alcálicos y un gran esfuerzo ténsil de 110 000 psi o ligeramente mayor. Si no fuera por su relativo bajo límite de servicio de temperatura probablemente podría ser usado más que los Polyes ters por su superior resistencia a la abrasión y resistencia química

g. permeabilidad

Es uno de los diseños primarios y parámetros de operación del medio filtrante. Esto es usualmente medido en m^3 de flujo de aire por m^2 (pie cúbico de flujo de aire por ft^2) de un nuevo o limpio filtro a una presión diferencial de 10 a 12.7 mm de columna de agua (0.50 in WG) a través del filtro, para un standard ASTM D-737. El rango de permeabilidad usual es desde 17 a 68 m^3/h por m^2

(10 a 40 ft³/min por ft²) a una caída de presión de 10 a 12 mm de columna de agua
 La permeabilidad es relacionada a la velocidad de filtración (relación aire-tela) y
 a la resistencia filtrante.

h. Velocidad de filtración

Es la medida en pies por minuto de flujo actual, o máximo flujo de diseño actual, a través del filtro en operación con capa de polvo presente esperado en las condiciones de operación y caída de presión. La relación de aire a tela es otra forma de expresar la velocidad de filtración como el volumen de flujo de aire en pie cúbico por minuto por pie² de área filtrante en operación con capa de polvo presente en la caída de presión de operación.

h. arrastre del filtro (S)

Es la medida en pulgadas de agua de la caída de presión a través de un filtro en la velocidad de filtración en pies por minuto a las condiciones de operación con capa de polvo presente. Con un filtro nuevo o limpio y a condiciones standard ASTM el arrastre podría ser proporcional a las mediciones de permeabilidad y volumen de flujo de aire por m² a 12.7 mm H₂O (ft² a 0.5 in WG).

Probablemente el más significante inconveniente en eficiencia filtrante en años recientes ha sido el desarrollo de filtros para materiales puntiagudos. La fábrica de fibras es todavía usada en algunas aplicaciones de baja presión o para altas temperaturas usando fibra de vidrio, cerámica o fibras metálicas.

2.3.3 Sistema de Limpieza del filtro recolector

Para un filtro colector de bolsas existen cuatro formas de limpiar la limpieza de su elemento filtrante:

- limpieza intermitente (ON - OFF)
- limpieza por sacudido

- limpieza por aire reverso
- limpieza por pulsos de aire

a. Limpieza intermitente

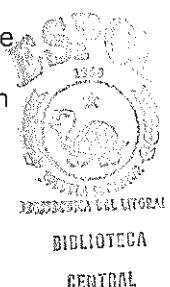
Es un colapso en la operación de un sistema de ventilación de colección por medio de un soplador descargador neumático que limpiará los filtros por el aflojamiento de la bolsa cuando el flujo de aire es apagado. Esto es usualmente una operación intermitente y una colección menos crítica. La bolsa, tambor, mezclador, acarreador o barra de carga y descarga transfieren una molestia generada de los colectores de polvo para que puedan ser limpiadas.

Si la operación y la carga de polvo permiten, esto es un sistema de limpieza a bajo costo. El efecto de limpieza intermitente o también llamado ON-OFF ó desplome o derrumbamiento es de algún beneficio en muchos colectores pero obviamente tiene efectos pequeños en sistemas de operación continua, que tienen que ser considerados en la limpieza ON-OFF, teniendo lugar cuando el colector es apagado al final de un período de operación o cuando existe un polvo externo. Los controles deberían proveer un dispositivo de tiempo de 5 a 10 minutos después de que el ventilador y equipo de colección se han apagado para cerrar la válvula o la descarga del transportador.

Estos deberían permitir que mucho material caiga de los filtros después que ellos desplomen para ser colectados en la tolva y vaciados exteriormente, asumiendo que no existe razón para mantener por mucho tiempo el material en la tolva.

b. Limpieza por sacudido

El sacudido mantiene limpia la filtración efectiva por sacudimiento periódicos de los filtros manuales, como cílicos por temporizador, por caída de presión con controles fotohélicos o por controles de cadena de operaciones.



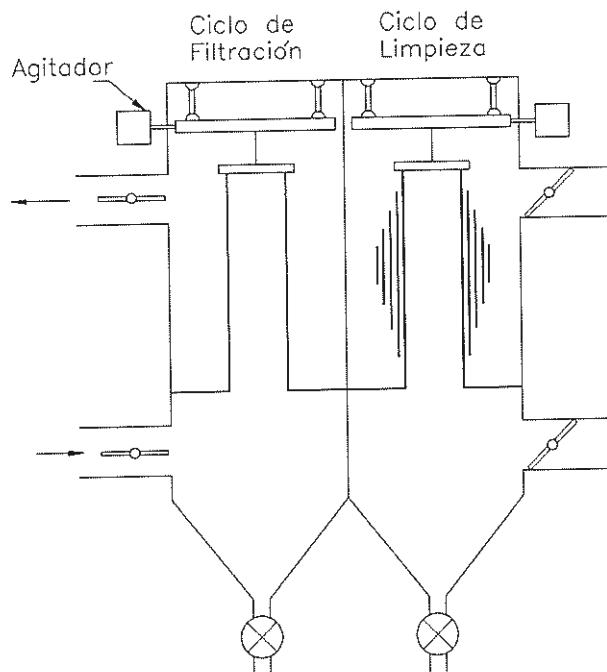


Figura 2.8 Esquema de un sistema de limpieza por sacudido

Para una circunstancia, un sistema de descarga de motor soplador podría ser encadenado al arrancar el sacudimiento del motor de limpieza en cualquier instante de operación del soplador. Generalmente un mecanismo exéntrico de motor-conductor sacude todas las mangas simultáneamente en unidades pequeñas o una sección a la vez en colectores más largos. La limpieza intermitente ó on - off desplaza la limpieza por sacudimiento donde quiera que el ventilador o soplador es encendido ó apagado y el polvo acumulado en los filtros de mangas se desploman.

c. Limpieza por aire reverso

La limpieza de aire reverso usa una relativa baja presión, usualmente de 2 a 4 psig y un suministro de un alto volumen de aire para limpiar los filtros en secuencia. La presión del aire de 6 a 15 psig puede ser suministrada por un ventilador centrifugo o alguna otra máquina de desplazamiento positivo para la limpieza de las bolsas filtrantes. Los ventiladores centrifugos han sido usados para limpieza de

aire reverso a bajas presiones de 2 a 4 psig generalmente.

Los filtros de tela tejida han sido ampliamente usados, pero en necesidades extremas las telas no tejidas es remplazada extensamente. Las telas no tejidas ayudan a reducir la caída de presión del sistema, costo de energía y penetración de la partícula y es más agradable con el uso de una membrana en la superficie de la tela filtrante permitiendo eficiencias de colección y vida de mangas más duradera.

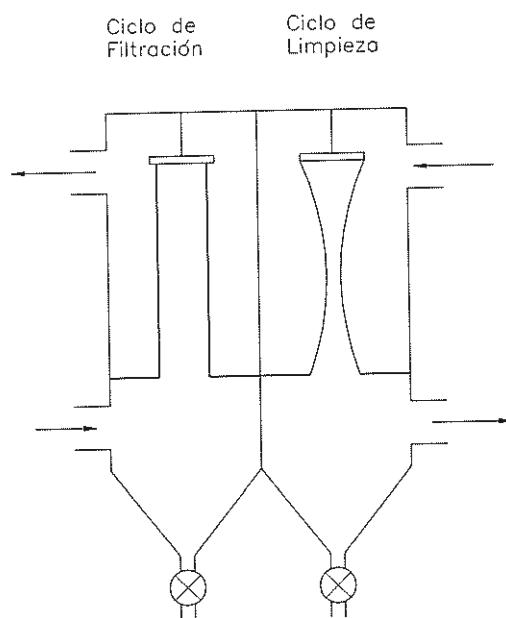


Figura 2.9 Esquema del sistema de limpieza de aire reverso

Los colectores de aire reverso pequeños y medianos usan un flujo de aire en forma de barrido por medio de un ventilador centrífugo o un pivote central para limpieza sucesiva de líneas radiales de bolsas para lo cual el brazo es girado continuamente alrededor de una carcasa cilíndrica para este tipo de diseño de colectores. Por lo que el aire liberado puede ser controlado por un mecanismo de válvula reguladora, o controles electrónicos, para abrir un flujo de aire

mientras el brazo esté sobre cada línea de bolsas. Así la válvula cierra el flujo y permite el volumen en el brazo a manera de un reservorio de presión de aire.

La limpieza del aire puede ser diseñada para fluir continuamente y la entrada de los filtros al brazo rotativo sobre la linea de aberturas. Los colectores de aire reverso son generalmente divididos dentro de módulos o secciones para permitir a una sección de limpieza determinada permanecer fuera de la línea de colección de polvo. Esto puede ser hecho secuencialmente o por temporizadores y válvulas que permiten introducir el aire limpio a un módulo a la vez. Los dampers de mariposa o válvulas son usadas para abrir y cerrar la entrada de las corrientes de aire y / o salida, cada módulo automáticamente es controlado por un ciclo temporizado de limpieza.

d. Limpieza tipo pulso de aire

La limpieza de pulsos de aire a chorro usa típicamente aire o gas, usualmente a presiones de 70 a 100 psig, dirigidas a través de tuberías de aire. Las toberas o huecos perforados en la tubería son centrados sobre cada bolsa o manga para liberar un golpe de aire en un cono angosto típicamente por medio de la acción de una válvula de diafragma que abre para un pulso de 50 a 100 milisegundos, así se logra inflar a la manga y liberar un impulso de aire en contra flujo que rompe y limpia la coraza del filtro del lado sucio de la manga.

En limpiezas de pulsos de aire a chorro ó pulse jet, el pulso de presión de aire rompe el lecho de polvo desde la superficie de la manga mucho mejor que otros métodos. Por lo tanto, hay que considerar la precaución que la presión puede ser tan alta para el medio filtrante que debe de ser regulada para prevenir daños prematuros o vida de servicio reducida, especialmente con medios frágiles o cubiertas de superficie como membrana de teflón.

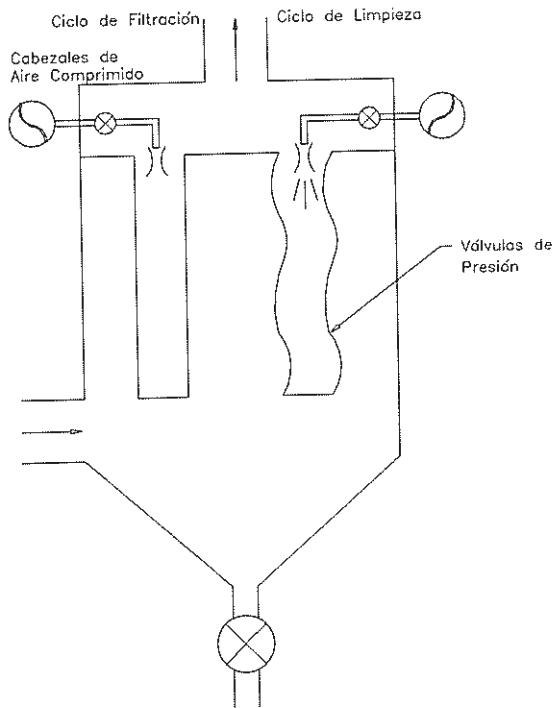


Figura 2.10 Esquema del sistema de limpieza pulso de aire a chorro

Una partícula muy fina, húmeda o otra coraza de polvo difícilmente puede incrementar la presión para una mejor limpieza, pero la excesiva limpieza puede dañar el frágil medio filtrante o reducir la vida útil del servicio de vida y debe ser usado con precaución.

2.3.4 Resistencia a la corrosión

Los materiales de construcción considerados normalmente son aquellos cuyo costo son los más bajos posibles, como es el caso del acero estructural A36, seguido por un buen método de protección anticorrosiva como la aplicación de pintura, recubrimiento de algún cerámico, o un recubrimiento de un caucho.

Cuando los factores de diseño son más severos, se puede recurrir a materiales más resistentes como el Acero Inoxidable 304, Acero Inoxidable 316, Aluminio, Fibra de Vidrio, Polivinil Cloruro (PVC), Inconel, Hastelloy y hasta en algunos

casos Titanium. Por consiguiente esos materiales tienen un costo muy elevado y solo se fabrican los colectores cuando sean justificados. El rendimiento de colección no depende del material escogido, pero un material mal seleccionado para una aplicación determinada puede causar que el diseño falle por corrosión.

Por lo tanto se considera a la pintura y al revestimiento como los métodos más usuales considerados para proveer resistencia a la corrosión para el Acero al Carbón, reduciendo significativamente los costos por selección de materiales de construcción. La preparación de la superficie y su rugosidad, deben ser los más idóneos para las propiedades y espesores de pintura, para lo cual es necesario conocer las especificaciones técnicas de la pintura, lo cual producirá una reducción de costos al arranque de la unidad.

El factor temperatura del proceso es un tópico básico para los recubrimientos. Usualmente se especifica una pintura epóxica o una pintura de uretano, pero si la temperatura de operación excede los límites usuales del recubrimiento (121°C), entonces se usa una Silicona Alkidica (538 °C), cuando las condiciones corrosivas de temperatura y humedad llegan a ser severas, los revestimientos escogidos son limitados.

Resistencia mecánica

El encerramiento del colector debe ser fuerte para condiciones de seguridad donde se espera presiones positivas o negativas del proceso. La más común exposición es una presión negativa de vacío de 12 a 18 in WG, donde la corriente de aire es dibujada a través del filtro. La estructura del colector es usualmente suficiente en una forma rectangular construida en Acero al Carbono o en Acero Inoxidable de 3 hasta 10 mm de espesor con refuerzos estructurales cada 32 pulgadas entre centros.

Las presiones de vacío más grandes pueden ser soportadas por cerramientos

estructurales o con cerramientos de forma cilíndricas. Un diseño circular es inherentemente mucho más fuerte que un diseño rectangular. Es también necesario certificar la rigidez de la estructura del colector y la estructura del soporte del mismo. En algunas ocasiones se considera en las especificaciones el máximo de peso esperado en la captación de polvo en la tolva a ser retenido en el colector. Algunas operaciones requerirán que el peso de una tolva llena de polvo debe ser soportado pero de esta forma se elevará el costo.

2.3.5 Confiabilidad y mantenibilidad

Muchas consideraciones de seguridad y opciones de conveniencia se aplican a muchos tipos de sistemas de filtración y a muchos tipos de mecanismos de limpieza. Algunas son estrictamente problemas de seguridad. La existencia de polvo explosivo o gas explosivo obviamente es un problema de seguridad. Si es posible las conexiones eléctricas demuestran estar fuera del ambiente en particular para minimizar la posibilidad de fuego o explosión. Es posible siempre que fuese necesario desarrollar sistemas eléctricos con un gas inerte sumergido, para la prevención de chispas.

Construcciones de aleaciones no ferrosas chispas. Todo aislamiento eléctrico debe frecuentemente recibir inspección o mantenimiento para prevenir fallas.

Otro factor de seguridad a ser considerado en el revestimiento de los sistemas de colección de polvo involucra el control regular de las bolsas filtrantes mediante un control de inspección o un programa de reemplazo. Es frecuente cambiar mangas anticipadamente por razones inusuales de incursiones de procesos elevados de temperatura.

2.4 COMPONENTES AUXILIARES DEL FILTRO

A. Descargadores de polvo

El mayor equipamiento auxiliar asociado con el diseño de un filtro de mangas es el sistema de damper, necesario para un flujo de gas contaminante desde un compartimiento a otro en mecanismos intermitentes de limpieza, limpieza de sacudido mecánico, aire reverso y pulse jet, que son necesarios en los sistemas de evacuación de polvo colectado al final del ciclo de limpieza por medio de:

a. Válvulas Rotativas

Las válvulas rotativas se usan en colectores de polvo medianos y grandes para distribuir el material de una zona de presión a otra, a cierta velocidad sin afectar las diferentes presiones en los dos puntos. Las válvulas rotatorias operan igual que las puertas giratorias. Las aspas forman un sellado hermético con la estructura y el motor hace que las aspas giren lentamente para permitir que el polvo que está recolectado en la tolva se desaloje.

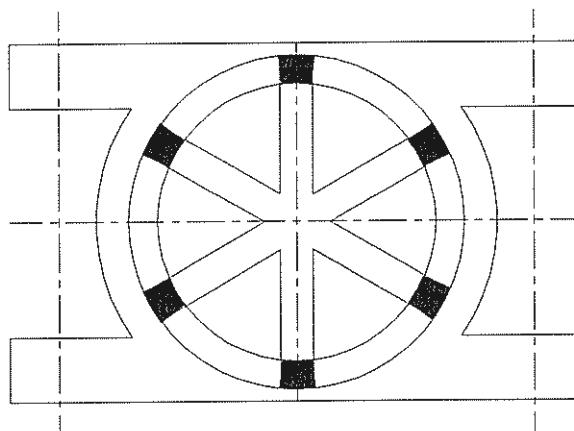


Figura 2.11 Válvula rotativa o rotatoria simple

Las válvulas rotativas o rotatorias transportan material a una razón lineal de 10 rpm. Cuando pasa de esta velocidad su eficiencia disminuye a un 92 ó 93 %. A 20 rpm, su eficiencia se reduce a un 63 % debido a que la válvula no tiene tiempo suficiente para llenarse. Sin embargo la máxima velocidad normal es usualmente de 25 rpm. Su costo es relativamente bajo, de fácil mantenibilidad, de alta simplicidad y generalmente adecuada para sellar fugas, la hacen el descargador standard. Las válvulas rotativas son usadas en presiones diferenciales superiores a 10 psig.

b. Valvulas de Compuerta Doble

Básicamente son dos ductos o cámaras localizadas verticalmente que operan alternativamente en secuencia, mientras que la primera se encuentra abierta, la otra se mantiene cerrada.

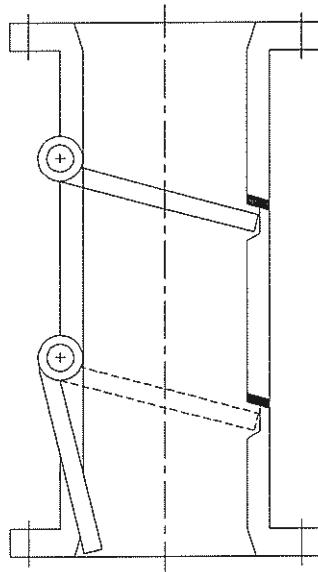


Figura 2.12 Válvula de doble compuerta

Esto produce un sello de aire todo el tiempo, con compuertas cerradas alternadamente el sellado puede realizarcelo metal con metal o un sello de empaque flexible en la parte inferior de la cámara. Las válvulas de doble compuerta son cicladas usualmente a 6 veces por minuto de su capacidad o más, aplicables a materiales abrasivos de alta temperatura. Manejan presiones diferenciales superiores a 30 lbf / in², son de fácil mantenimiento, reduce significamente las fugas de aire.

c. Transportadores de Tornillo Sin-Fin

Actualmente el mecanismo de desalojo de material más usado en los colectores de polvo. El diseño básico consiste de un tornillo en espiral soldado en un eje tubular y sostenido en rodamientos o chumaceras de pedestal a través de una carcasa tubular. Cuando es girado el eje, las aletas espirales empujan el material de polvo a lo largo del tubo hasta la abertura de descarga, y como todo descargador mientras más gira, más material entrega.

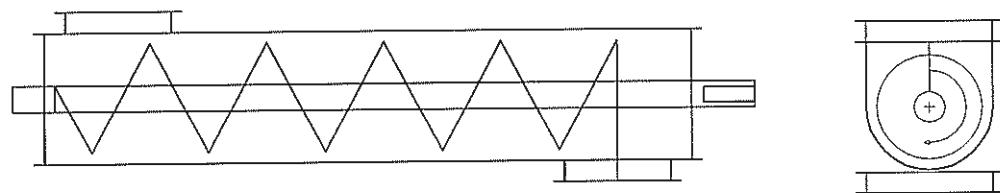


Figura 2.13 Transportador sin fin en un colector de polvo

La capacidad de un tornillo descargador es determinado por su diámetro, paso de la hélice, velocidad de rotación, carga de sección transversal y la razón a la cual el material es permitido ascender dentro del tornillo.

B. Tolvas

Constituyen otro de los elementos auxiliares en un colector de mangas. Las tolvas no deben usarse para almacenamiento de material por lo consiguiente el polvo colectado debe desalojarse al exterior o reusarse en el proceso de producción, lo más pronto posible. El polvo debe removese continuamente para evitar aglomeraciones arqueadas y apelmazamiento de material en las paredes. Las tolvas generalmente tienen pendientes de 60° para permitir que el polvo se deslice con facilidad hacia la apertura de descarga.

También tienen puertas de acceso para facilitar su limpieza, inspección y mantenimiento. Dos importantes definiciones de las características de flujo del recipiente de almacenamiento son el flujo de masa, el cual significa que todo el material en el recipiente se mueve siempre que algo de él es retirado.

Debe de considerarse, además del flujo de embudo, el cual ocurre cuando solamente una porción del material fluye (generalmente en un canal en el centro del sistema), cuando el material es desalojado. Las tolvas con características de flujo de masa, son las más requeridas, el material fluye por sí solo, siempre que la puerta del fondo es abierta. Un método común para el diseño de Tolvas, es medir el ángulo de reposo. Esta es la propiedad más familiar de flujo de un sólido seco y está definido como el ángulo constante a la horizontal, medido en un montículo cónico del material.

La relación del flujo al ángulo de reposo es como sigue:

Los granos de flujo libre tendrán un ángulo (γ) en el rango de 25 a 30° , de 38 a 45° están los polvos granulados de flujo regular. A menor valor de, el sólido será más

fluidizable. El flujo másico requiere de dos condiciones:

1. La tolva debe ser lo suficientemente inclinada, por lo cual es suficiente prever una pendiente de 45° y lisa para que el campo de presiones de flujo para un campo radial se desarrolle dentro de la tolva.
2. Las presiones ejercidas por el sólido en la parte cilíndrica (ó rectangular) de la Tolva deben ser iguales o mayores que las presiones radiales.

Cuando ocurre un aglutamiento del material, ya sea debido a la forma de la tolva o a las propiedades cohesivas del producto, se forma un arco que es capaz de soportar un esfuerzo considerable. Se tiene entonces una transferencia de carga a las paredes de la tolva lo cual hace que el coeficiente cinemático de fricción se incremente. El resultado neto es que este arco o domo, impida cualquier flujo desde el recipiente y deberá entonces aplicarse una fuerza de tal forma que el arco se colapse y el flujo empiece aunque sea erráticamente.

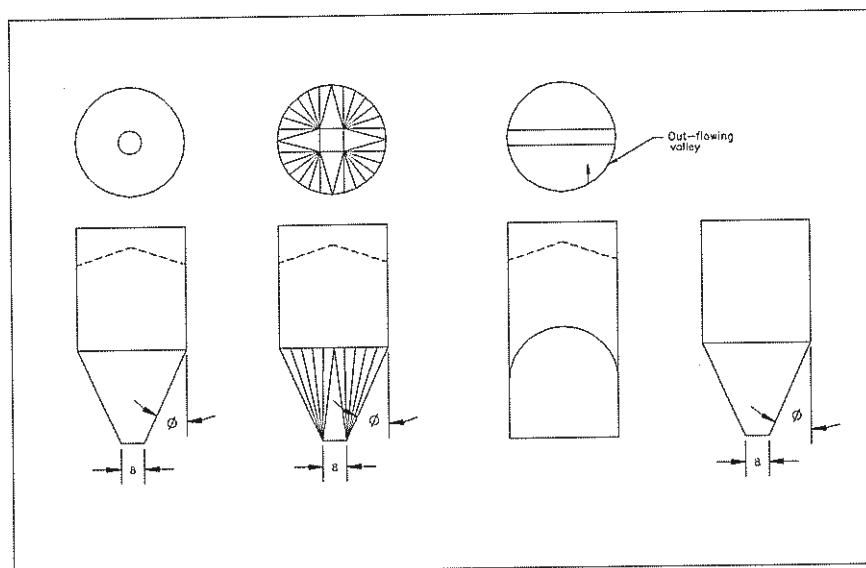


Figura 2.14 Tipos de tolvas

C. Ventiladores

El aire o gas en un sistema de colección de polvo debe de ser trasladado por un ventilador o otros medios de movimiento de aire. Los dispositivos de movimiento del aire pueden ser divididos dentro de dos clasificaciones básicas: ejectores y ventiladores. Los ejectores tienen baja eficiencia de operación y son usados solo para aplicaciones especiales de manejo de material y en algunas ocasiones cuando no es deseable tener pase de aire contaminado directamente a través del dispositivo de movimiento de aire, son generalmente aplicados para corrientes de aire corrosivos, flamables, explosivos, materiales calientes o puntiagudos que pueden dañar al ventilador o presentar una situación de operación peligrosa.

Los ventiladores son el dispositivo primario de manejo de material usado en las aplicaciones industriales. Los ventiladores pueden ser definidos en tres grupos básicos: axial, centrífugo y tipos especiales. Como una regla general, los ventiladores axiales son usados para flujos más altos a resistencias más bajas y los ventiladores centrífugos son usados para flujos más bajos y resistencias más altas.

Los ventiladores centrífugos pueden tener tres diseños básicos:

- curvados hacia adelante
- impeler radial
- impeler curvados hacia atrás

a. Consideraciones en la selección del ventilador

Algunos puntos importantes se deben considerar cuando se selecciona un ventilador:

1. Volumen total de corriente de aire en pies cúbicos por minuto determinado de los volúmenes de recolección de las campanas y ductos de trabajo
2. La presión estática requerida para el sistema del ducto de trabajo
3. Localización del lado sucio o limpio del colector
4. Tipo de polvo o material sólido a ser manejado y si es corrosivo, flamable o de

naturaleza explósiva

5. Temperatura, altitud y humedad de operación
6. Límites de ruido requerido
7. Optima selección del dimensionamiento del ventilador para tamaño y potencia requerida de acoplamiento directo, transmisión por bandas o control de velocidad variable.
8. Efectos corrosivos en los materiales, en la selección de los materiales de construcción del ventilador, desde un Acero al Carbón, Acero Inoxidable o otras aleaciones, construcción resistentes a chispas, fibra de vidrio, PVC o protegido con recubrimiento.

Un ventilador es diseñado para un volumen desarrollado para el mismo y sólo puede ser cambiado la velocidad o la resistencia. Los ductos de trabajo, dampers, tipo de colectores y configuración de la descarga determinaron la resistencia del sistema y así afecta los niveles del volumen de aire manejado, en otras palabras cualquier variación del sistema producirá cambios al funcionamiento del ventilador, por lo tanto es prudente conocer las leyes de los ventiladores:

1. El Volumen varía directamente con la velocidad

$$CFM_2 / CFM_1 = RPM_2 / RPM_1$$
2. El Volumen permanece constante aunque se presenten cambios en la densidad del aire
3. La Presión varía con el cuadrado del radio de la velocidad

$$P_2 / P_1 = (RPM_2 / RPM_1)^2$$

4. La Presión varía directamente con la densidad

$$P_2 / P_1 = D_2 / D_1$$
5. La Potencia varía con el cubo del radio de la velocidad

$$HP_2 / HP_1 = (RPM_2 / RPM_1)^3$$

6. La Potencia varía directamente con la densidad

$$(HP_2 / HP_1) = D_2 / D_1$$

Por lo tanto, las pérdidas de presión a través de los filtros colectores se incrementa directamente con el cambio en volumen de aire. Es necesario recordar la siguiente fórmula para el cálculo de la potencia de un ventilador:

Volumen (ft³ / min) * Presión Total (in WG)

HP = -----

6356 * eficiencia mecánica del ventilador

CAPITULO III

CALCULOS Y DISEÑOS INGENIERILES

3.1 Diseño definitivo de la unidad

De acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente, observamos que tenemos un diámetro de partícula de aproximadamente 90 um, para la materia prima de Tripolifosfato y un diámetro de partícula de 75 um para el Carbonato de Sodio liviano, por lo cual en nuestro diseño asumiremos estos valores como reales en cada punto de captura del esquema.

Primeramente debemos de calcular la mínima velocidad de sustentación de la partícula más grande para garantizar que tanto en el tramo horizontal como en el tramo vertical no se producirá asentamiento del material, para lo cual hacemos uso de las ecuaciones:

$$V_{c,h} = 270 \frac{\rho_s}{\rho_s + 62.3} Ds^{0.4}$$

$$V_{c,v} = 910 \frac{\rho_s}{\rho_s + 62.3} Ds^{0.6}$$

Entonces para efecto de cálculos se asumirá como si toda nuestra materia prima fuera Tripolifosfato:

$$\begin{array}{llll} \rho \text{ aire} & = & 1.14 \text{ Kg/m}^3 & = 0.0748 \text{ lbm/ft}^3 \\ \text{tripolifosfato} & = & 911.5 \text{ Kg/m}^3 & = 56.8274 \text{ lbm/ft}^3 \end{array}$$

$$Ds = 90 \text{ um} = 0.0035 \text{ pulgadas}$$

$$56.8274 \quad 0.0035^{0.4}$$

$$V_{c,h} = 270 \frac{56.8274 + 62.3}{12}$$

$$V_{c,h} = 4.9644 \text{ ft/seg} = 1.51 \text{ m/s}$$

$$56.8274 \quad 0.0035^{0.6}$$

$$V_{c,v} = 910 \frac{56.8274 + 62.3}{12}$$

$$V_{c,v} = 3.2849 \text{ ft/seg} = 1.00 \text{ m/s}$$

Los valores anotados arriba son las velocidades minimas de acarreo que debe de tener la partícula para que no se produzca sedimentación. Para efectos de la selección de las velocidades de suspensión recurrimos a la tabla 4.2 del manual de Ventilación Industrial 20 edición que describe el rango de velocidades de diseño en ft / min, para diferentes materiales, estos valores incluyen factores de seguridad para evitar apelmasamientos o aglomeraciones del producto a transportar, por lo tanto nuestra materia prima seleccionada como base de nuestro estudio cae en el rango de 12.7033 - 15.2439 m / s (2500 - 3000 ft/min) de acuerdo a la naturaleza de los contaminantes, para polvos secos, por lo cual se asume una velocidad de 12.7033 m/s.

a. Cálculo de las caídas de presión en el ducto

El esquema propuesto es el de la figura modificada de la tubería de aspiración en la sección Rompesacos. Se toma como hipótesis de que la partícula a transportarse tiene la forma de una esfera para ambos casos, y así escogeremos el método de balanceo para el diseño del ducto que basa su principio en la velocidad constante. Se asume para ambos ramales una velocidad de 12.7033 m / s (2500 ft/min) que se

mantiene constante en el ducto, esto es:

$$Q_a = Q_b = Q_c = Q_d = 850.1582 \text{ m}^3/\text{h} \quad (500 \text{ cfm})$$

Ramal 1 a

$$Q = 850.1582 \text{ m}^3/\text{h} = 0.2362 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = A * v$$

$$0.2362 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \frac{0.2362}{12.7033 \text{ m/s}}$$

$$A = 0.0186 \text{ m}^2$$

$$A = \pi / 4 * O^2$$

$$O^2 = 4 * 0.0186 / \pi$$

$$O^2 = 0.0237 \text{ m}^2$$

$$O = 0.1539 \text{ m} \quad (6.0571 \text{ pulgadas})$$

$$O = 0.1539 \text{ m}, \quad Q = 850.1582 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v = 4.003 \text{ vp}^{1/2}$$

$$12.703 = 4.003 \text{ vp}^{1/2}$$

$$vp = (12.7033 / 4.003)^2$$

$$vp = 10.0708 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.3965 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

Nuestro ducto a la entrada tiene una extracción localizada, y de acuerdo al esquema propuesto para una hendidura de 152.4 mm * 304.8 mm (6" * 12") debemos de calcular las pérdidas por entrada del fluido al ducto, según la fig. 6-10 del Manual de Ventilación Industrial:

$$he = 1.78 \text{ VP}$$

$$he = 1.78 * 10.0708$$

$$he = 17.9260 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.7057 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

A continuación se calcula las pérdidas en el codo, h codo, de acuerdo a la fig. 6.11 del Manual de Ventilación Industrial (Apendice D), tenemos que para un $R = 2.75$ O:

$$h_c = 0.26 \cdot VP \text{ (sección circular)}$$

$$h_c = 0.26 \cdot VP$$

$$h_c = 0.26 \cdot 10.0708$$

$$h_c = 2.6184 \text{ mm H}_2\text{O} \text{ (0.1031 pulgadas de H}_2\text{O)}$$

Necesitamos calcular las pérdidas por tramo de longitud, h longitud (h_l) para un tramo de 3.8476 m (12.62 fts), de acuerdo a la figura 6 - 16 a, obtenemos que para un caudal de $850.1582 \text{ m}^3/\text{h}$ (500 cfm), para un diámetro de 152.4 mm (6 ") tenemos:

$$1.82 \text{ in H}_2\text{O}$$

$$h_l = \frac{1.82}{100} \cdot Lt$$

$$\text{donde } Lt = 3.8476 \text{ m} \quad h_l = 5.8340 \text{ mm H}_2\text{O} \text{ (0.2297 pulgadas de H}_2\text{O)}$$

$$H_{total} = h_e + h_c + h_l$$

$$H_{total} = 17.9260 + 2.6184 + 5.8340 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$H_{total} = 26.3784 \text{ mm H}_2\text{O} \text{ (1.0385 pulgadas de H}_2\text{O)}$$

$$SPa_1 = VP + ha_1$$

$$SPa_1 = 10.0708 + 26.3784 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$SPa_1 = 36.4492 \text{ mm H}_2\text{O} \text{ (1.4350 pulgadas de H}_2\text{O)}$$

Para efectos de cálculos procedemos a realizar el mismo procedimiento para cada uno de los ramales faltantes:

Ramal	Q m ³ /h	v m/s	O mm H ₂ O	vp mm H ₂ O	he mm H ₂ O	hb mm H ₂ O	hl mm H ₂ O	Htotal mm H ₂ O	SPb 1 mm H ₂ O
b 1	850.158	12.703	153.9	10.071	5.247	2.819	2.811	10.877	20.948

he = 0.49 Vp, extracción localizada con bridas

hb = 0.28 Vp

l = 1.85 m

En este punto tenemos que la SPa 1 y SPb 1 no coinciden numéricamente, por lo tanto tenemos que aplicar el balanceo

$$Q_a = 850.1582 \text{ m}^3/\text{h} (500 \text{ cfm})$$

$$Q = 1700.3164 \text{ m}^3/\text{h} (1000 \text{ cfm})$$

$$SPa 1 = 36.4492 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$Q = 850.1582 \text{ m}^3/\text{h} (500 \text{ cfm})$$

$$SPb 1 = 20.948 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$V1' \quad SPa 1$$

$$---- = -----$$

$$V1 \quad SPb 1$$

$$V1' = 12.7033 (36.4492 / 20.948)^{1/2}$$

$$V1' = 16.7567 \text{ m/s} (3297.7186 \text{ ft/min})$$

entonces:

$$Q = \frac{\pi}{4} * O^2 * V1'$$

4

$$Qb 1 = 1100.4006 \text{ m}^3/\text{h} (647.174 \text{ cfm})$$

$$Q_a 1 = 850.1582 \text{ m}^3/\text{h} \quad Q = 1950.5588 \text{ m}^3/\text{h} (1147.1741 \text{ cfm})$$

$$Q_b 1 = 1100.4006 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para un $Q = 1950.5588 \text{ m}^3/\text{h}$ (1147.1741 cfm) escojo un diámetro de 203.2 mm (8"), entonces debo conocer la velocidad en el ducto para futuras operaciones:

$$Q = A * v$$

$$1950.5588 \text{ m}^3/\text{h} = \pi / 4 * (.2032)^2 * v$$

$$0.5418 \text{ m}^3/\text{s} = \pi / 4 * (.2032)^2 * v$$

$$v = 16.7078 \text{ m/s} (3288.095 \text{ ft/min})$$

Ducto #	O	área	Q	v	VP	SP
	mm	m ²	m ³ /h	m/s	mm H ₂ O	mm H ₂ O
a 1	153.9	0.0186	850.1582	12.7033	10.0708	-36.4492
b 1	153.9	0.0186	1100.4006	16.4337	16.8539	-36.4492
1 3	203.2	0.0324	1950.5588	16.7078	17.4208	-----

$$VPr = \frac{Q_a 1 + Q_b 1}{4.003 (A1+A2)} = \frac{0.2362 + 0.3057}{4.003 (0.0186 + 0.0324)} = 13.2428 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$SP1 = SPa 1 - (VP1 - VPr) = -36.4492 \text{ mm H}_2\text{O} - (17.4208 - 13.2428)$$

$$SP1 = -40.6272 \text{ mm H}_2\text{O} (-1.5995 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

Entonces en el punto 1, tenemos a la salida del ramal

$$SP1 = -40.6272 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$Q_{1,3} = 1950.5588 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$VP = 17.4208 \text{ mm H}_2\text{O}$$

ahora calculamos las pérdidas por el codo, para un codo a 90° con un mínimo $R = 2.5 \text{ O}$, tenemos:

$$hc = 0.22 VP$$

$$hc = 0.22 * 17.4208$$

$$hc = 3.8326 \text{ mm H}_2\text{O}$$

seguimos con hl (pérdidas por longitud), así tenemos que para un $Q = 1950.5588 \text{ m}^3/\text{h}$ y una velocidad de 16.7078 m/s entramos a la fig. 6 - 16 del Manual de Ventilación Industrial y leemos:

$$2.0 \text{ in H}_2\text{O}$$

$$hl = \frac{\text{-----}}{100 \text{ ft}} * Lt$$

$$hl = 2.0 \text{ in H}_2\text{O} * 11.8 \text{ ft} / 100 \text{ ft}$$

$$hl = 5.9944 \text{ mm H}_2\text{O} (0.2360 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

$$\begin{aligned} h_{\text{total}} &= hc_{\text{odo}} + hl \\ &= 3.8326 + 5.9944 \text{ mm H}_2\text{O} \\ &= 9.8270 \text{ mm H}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SP1 \text{ a} &= VP + h_{\text{total}} \\ &= 17.4208 + 9.8270 \\ &= 27.2478 \text{ mm H}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SP3 &= SPa \text{ 1} + SP1 \text{ 3} \\ &= -40.6272 \text{ mm H}_2\text{O} - 27.2478 \text{ mm H}_2\text{O} \\ &= -67.8750 \text{ mm H}_2\text{O} \end{aligned}$$

ahora procederemos a calcular las pérdidas en el ramal d 2, usando el mismo procedimiento anterior, obteniendo:

Ramal	Q m ³ /h	v m/s	O mm	vp mm H ₂ O	he mm H ₂ O	hc mm H ₂ O	hl mm H ₂ O	Htotal mm H ₂ O	SPd 2 mm H ₂ O
d 2	850.158	12.703	153.9	10.071	1.511	10.472	16.07	28.053	38.124

he = 0.15 VP, entrada en forma de campana de cono

hc = 0.26 VP, para R = 2.75 VP y 4 codos

Lt = 10.6 m

Ramal	Q m ³ /h	v m/s	O mm	vp mm H ₂ O	he mm H ₂ O	hb mm H ₂ O	hl mm H ₂ O	Htotal mm H ₂ O	SPc 2 mm H ₂ O
c 2	850.158	12.703	153.9	10.071	4.935	2.820	2.851	10.606	20.677

he = 0.49 VP, entrada en forma de campana

hb = 0.28 VP, entrada al ramal con ángulo de 45°

Lt = 1.88 m

1700.3164 m³/h

Qd 2 = 850.1582 m³/h, -38.124 mm H₂O

Qc 2 = 850.1582 m³/h, -20.677 mm H₂O

Ducto #	O mm	área m ²	Q m ³ /h	v m/s	VP		SP mm H ₂ O
					mm H ₂ O	mm H ₂ O	
d 2	153.9	0.0186	850.1582	12.7033	10.0708	- 38.124	
c 2	153.9	0.0186	1155.0146	17.2493	18.5683	- 38.124	
1 3	203.2	0.0324	2005.1728	17.1911	18.4432	-----	

VPr = 13.9908 mm H₂O

SP2 = SPb 1 - (VP1 - VPr) = - 42.5764 mm H₂O

entonces en el punto 2, tenemos a la salida del ramal:

$$SP_2 = -42.5764 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (-1.6762 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

$$Q = 2005.1728 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$VP = 18.4432 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$hl = 6.604 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$hc = 4.7952 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$H_{\text{total}} = hc + hl$$

$$= 4.7952 + 6.604 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$H_{\text{total}} = 11.3992 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$SP_2 \ 3 = VP + H_{\text{total}}$$

$$SP_2 \ 3 = 29.8424 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (1.1749 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

$$SP_3 = SP_c \ 2 + SP_2 \ 3$$

$$= -42.57641.6362 - 29.8424$$

$$SP_3 = -72.4188 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (2.8511 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

$$Q_{23} = 2005.1728 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$SP = -72.4188 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$Q = 3955.7316 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{13} = 1950.5588 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$SP = -67.8750 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{13} + Q_{23}$$

$$= 2014.7901 + 2005.1728 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\text{total}} = 4019.9629 \text{ m}^3/\text{h}$$

asumimos un diámetro de 279.4 mm (11 pulgadas)

$$Q = 4019.9629 \text{ m}^3/\text{h} = \pi / 4 * O^2 * v$$

$$4019.9629 \text{ m}^3/\text{h} * 4$$

$$O^2 = \frac{\pi * v}{4}$$

$$v = 18.2128 \text{ m/s (3584 fpm)}$$

$$Q = 4019.9629 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$SP = -72.4188 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Ducto #	O	área	Q	v	VP	SP
	mm	m ²	m ³ /h	m/s	mm H ₂ O	mm H ₂ O
1 3	203.2	0.0325	2005.1728	17.1382	18.3299	-72.4188
2 3	203.2	0.0325	2014.7901	17.2204	18.5061	-72.4188
3	279.4	0.0613	4019.9629	18.2188	20.7142	-----

$$VPr = 18.4179 \text{ m/s}$$

$$SP3 = SP3 1 - (VP3 - VPr)$$

$$= -74.7151 \text{ mm H}_2\text{O}$$

ahora calculamos las pérdidas hasta el ingreso al filtro, con $v = 18.2188 \text{ m/s}$ y un diámetro de 279.2 mm (11") encontramos que h_l por la figura 6.16b, tenemos:

$$1.6 \text{ in H}_2\text{O}$$

$$h_l = \frac{1.6}{100} * 2.62 \text{ ft}$$

$$100$$

$$h_l = 1.0648 \text{ mm H}_2\text{O (0.0419 pulgadas de H}_2\text{O)}$$

Se calcula además las pérdidas por expansión, del Manual de Ventilación Industrial para un $O_2 / O_1 = 1.3750$ y 30° de ángulo.

$$h_e = 0.79 \text{ VP}$$

$$h_e = 16.3642 \text{ mm H}_2\text{O} (0.6443 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

$$H_{\text{total}} = h_l + h_e$$

$$H_{\text{total}} = 17.3890 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$SP_{3,4} = VP + H_t$$

$$= 20.7142 + 17.3642$$

$$SP_{3,4} = 38.0784 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$SP_4 = SP_{3,4} + SP_3$$

$$= -30.0784 - 72.4188$$

$$SP_4 = -102.4972 \text{ mm H}_2\text{O}$$

ahora escogemos el tramo más largo para calcular la caída de presión total, que es el ramal c 2, hasta la entrada del filtro donde:

ramal	velocidad	diámetro	caudal
c 2	12.7033 m/s	0.1524 m	850.1582 m ³ /h
2 3	17.2204 m/s	0.2032 m	2014.7901 m ³ /h
3 4	18.2188 m/s	0.2794 m	4019.9629 m ³ /h

b. consideraciones para el diseño

Para nuestro diseño asumimos que el filtro manejará un máximo de 360 gr/m³ de sólidos en suspensión:

$$360 \text{ gr / m}^3 * 1 \text{ m}^3 / 3.28 \text{ ft}^3 = 10.20 \text{ gr / ft}^3$$

Así para un flujo de aire seleccionado de $Q = 4019.9629 \text{ m}^3/\text{h}$ ($2364 \text{ ft}^3/\text{min}$) que es el caudal de diseño del colector

$$2500 \text{ ft}^3/\text{min} * 10.20 \text{ gr/ft}^3$$

$$\hline = 3.64 \text{ lbm/min de masa recolectada}$$

$$7000 \text{ gr/lb}$$

$$3.64 \text{ lbm/min} = 0.061 \text{ lbm/seg} = 100 \text{ kg/h}$$

En el diseño del colector de mangas se han tomado las siguientes ASUNCIIONES:

- Forma de la partícula a capturar es esférica de superficie lisa
- El flujo es Newtoniano
- Los ramales se encuentran en paralelo, por lo cual las pérdidas en ambos ramales se mantienen constantes y es así que escogemos el tramo más largo, ramal 1 b para el cálculo de la caída de presión total
- La densidad del gas es la densidad real del aire
- La velocidad real del aire es dos veces la velocidad del sólido

$$ws = 100 \text{ kg/h}$$

$$ws = 0.0278 \text{ kg/s} (0.0607 \text{ lbm/seg})$$

ramal c 2

$$A = \pi / 4 * O^2$$

$$A = \pi / 4 * (0.1524)^2$$

$$A = 0.0182 \text{ m}^2 (0.1963 \text{ ft}^2)$$

$$Gs = ws / A$$

$$Gs = 0.0278 / 0.0182$$

$$Gs = 1.5263 \text{ kg/seg} * \text{m}^2 (0.3121 \text{ lbm/seg} * \text{ft}^2)$$

$$pds = Gs / Vs$$

$$V_a = 2 Vs$$

$$V_s = V_a / 2$$

$$V_s = 12.7033 / 2$$

$$V_s = 6.3517 \text{ m/s} \quad (20.8334 \text{ ft/s})$$

$$1.5263 \text{ kg/s} * \text{m}^2$$

$$\rho_{ds} = \frac{\rho}{V_s} = \frac{\rho}{6.3517 \text{ m/s}}$$

$$\rho_{ds} = 0.2403 \text{ kg/m}^3 \quad (0.0150 \text{ lbm/ft}^3)$$

Obtendremos luego el coeficiente de arrastre, por lo cual definimos N_{Re}

$$D_s (V_G - V_s)$$

$$N_{Re} = \frac{D_s (V_G - V_s)}{\mu g}$$

$$= \frac{0.0003 (41.6668 - 20.8334) * 0.0748}{\mu g}$$

$$= \frac{418 * 10^{-9}}{418 * 10^{-9}}$$

$$N_{Re} = 1118.4246$$

Con N_{Re} entramos al gráfico de coeficiente de arrastre versus N_{Re} y procedemos a leer que para un valor de $N_{Re} = 1118.4246$ tenemos un coeficiente de arrastre $C = 0.43$ para lo que esferas se refiere

rama 1 c 2

b.1 caída de presión en el tramo vertical

b.1.1 Para acelerar el gas a la velocidad de arrastre

$$G_G * V_G$$

$$\Delta P_{a,G} = \frac{G_G * V_G}{2 g c}$$

$$2 g c$$

donde,

$$\begin{aligned} G_G &= \rho_G * V_G \\ &= 0.075 \text{ lbm/ft}^3 * 41.6668 \text{ ft/s} \\ G_G &= 15.2818 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (3.1250 \text{ lbm/ft}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

$$3.1250 \text{ lbm/ft}^2 \cdot \text{s} * 41.6668 \text{ ft/s}$$

$$\Delta P_{a,G} = \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{2 * 32.17 \frac{\text{lbf} \cdot \text{s}^2}{\text{ft}^2}}$$

$$\Delta P_{a,G} = \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} * \frac{\text{ft}^2}{144 \text{ in}^2} * \frac{27.7}{1 \text{ lbf/in}^2}$$

$$\Delta P_{a,G} = 0.3924 \text{ pulgadas H}_2\text{O}$$

$$\Delta P_{a,G} = 9.9670 \text{ mm H}_2\text{O}$$

b.1.2 Para acelerar las partículas sólidas

$$\begin{aligned} G_s * V_s \\ \Delta P_{a,s} = \frac{\text{lbm} \cdot \text{s} \cdot \text{ft}^2}{\text{gc}} \end{aligned}$$

$$0.3121 \text{ lbm/s-ft}^2 * 20.8334 \text{ ft/s}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{a,s} &= \frac{32.17 \text{ lbm-ft/lbf-s}^2}{\text{gc}} \\ &= 0.2021 \text{ lbf/ft}^2 \\ \Delta P_{a,s} &= 0.9875 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.0389 \text{ in H}_2\text{O}) \end{aligned}$$

b.1.3 Para la fricción entre el gas y la pared de la tubería

$$4 f_G L \rho_G V_G^2$$

$$\Delta P f_G = \frac{4 f_G L \rho_G V_G^2}{2 g_c D_t}$$

$$4 f_G L G_G V_G$$

$$\Delta P f_G = \frac{4 f_G L G_G V_G}{2 g_c D_t}$$

$$\rho_G V_G D_t$$

$$Re_G = \frac{\rho_G V_G D_t}{\mu_G}$$

$$0.075 \text{ lbm/ft}^3 * 41.6668 \text{ ft/seg} * 0.5 \text{ ft/s}$$

$$Re_G = \frac{0.075 * 41.6668 * 0.5}{4.18 * 10^{-7} \text{ lbf-s/ft}^2}$$

$$Re_G = 3.7380 * 10^6$$

e/d rugosidad relativa, fig 8-13 de Fox and Macdonald, para un $D = 152.4 \text{ mm}$ (6 pulgadas) escogemos hierro galvanizado $e = 0.0005$, esto implica que $e/d = 0.001$ con $Re_G = 3.7380 * 10^6$ y $e/d = 0.001$ nos vamos a la figura 8-12 y escogemos un valor de f (factor de fricción), $f = 0.02$

$$4 f_G L G_G V_G$$

$$\Delta P f_G = \frac{4 f_G L G_G V_G}{2 g_c D_t}$$

$$4 * 0.02 * 3.1250 * 41.6668 * Lh$$

$$= \frac{4 * 0.02 * 3.1250 * 41.6668 * Lh}{2 * 32.17 * (6/12)}$$

$$= 2 * 32.17 * (6/12)$$

donde L_h , es la longitud horizontal de tubería + la longitud equivalente de codos + longitud de entrada por incidencia de un ramo. De acuerdo a la fig. 6-15, la longitud equivalente para codos de 6" de 2.5 O de R es 6 fts apróximadamente, ahora son 3 codos horizontales y para un ramal con cambio de sección 6 fts.

$$L_h = 16.4 + 3*6 + 6 = 40.4 \text{ pies} = 12.3171 \text{ m}$$

$$\Delta P_{f,g} = 13.0816 \text{ lbf/ft}^2$$

$$\Delta P_{f,g} = 63.9163 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (2.5164 \text{ pulgadas H}_2\text{O})$$

b.1.4 Para la fricción combinada entre partículas y la pared

$$4 f_s L G_s V_s$$

$$\Delta P_{f,s} = \frac{4 f_s}{2 g_c D_t}$$

$$3 \rho_G D_t C \quad V_G - V_s^2$$

$$\text{donde } 4 f_s = \frac{2 \rho_s D_s}{3 \rho_G D_t C} \quad \frac{V_G - V_s^2}{V_s}$$

$$3 * 0.0748 \text{ lbm/ft}^3 * 0.5 * 0.43 \quad 41.6668 - 20.8334^2$$

$$4 f_s = \frac{2 * 56.827 \text{ lbm/ft} * (0.0035/12)}{20.8334}$$

$$4 f_s = 1.4554$$

$$f_s = 0.3639$$

$$4 f_s G_s V_s L_h$$

$$\Delta P_{f,s} = \frac{4 f_s G_s V_s L_h}{2 g_c D_t}$$

$$4 (0.360) (0.3121) (20.8334) * 40.4$$

$$\Delta P_{f,s} = \frac{2 * 32.17 * 0.5}{}$$

$$\Delta P_{f,s} = 11.75 \text{ lb f/ft}^2 = 57.451 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (2.2618 \text{ pulgadas H}_2\text{O})$$

entonces la caída de presión total en el tramo recto es

$$\begin{aligned} \Delta P_{th} &= \Delta P_{a,g} + \Delta P_{a,s} + \Delta P_{f,g} + \Delta P_{f,s} \\ &= 9.9669 + 0.9875 + 63.9163 + 57.451 \quad \text{mm H}_2\text{O} \\ \Delta P_{th} &= 132.3217 \quad \text{mm H}_2\text{O} \end{aligned}$$

b.2 caída de presión en tramo Vertical

Se aplica el mismo procedimiento anterior para obtener la caída de presión para acelerar el gas a la velocidad de arrastre, caída de presión por aceleración de la partícula sólida, caída de presión entre el gas y la pared de la tubería, para la fricción combinada entre las partículas y la pared de la tubería.

b.2.1 Para la fricción entre el gas y la pared de la tubería

$$\Delta P_{f,g} = \frac{4 f_g I G_g V_g}{2 g_c D_t}$$

$$\Delta P_{f,g} = 21.9478 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.8641 \text{ pulgadas H}_2\text{O})$$

b.2.2 Para la fricción combinada entre las partículas y la pared de la tubería

$$\Delta P_{f,s} = \frac{4 f_s I G_s V_s}{2 g_c D_t}$$

$$\Delta P_{f,s} = 19.9459 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.7853 \text{ pulgadas H}_2\text{O})$$

b.2.3 Para soporte de la columna del gas

$$G_G \text{ g/L}$$

$$\Delta P_{h,G} = \frac{G_G \cdot g_c}{V_G}$$

$$3.75 \text{ lbm/s-ft}^2 * 32.2 \text{ ft/s}^2 * 13.872$$

$$= \frac{123.6668 \text{ ft/seg} * 32.17 \text{ lbm-ft/lbf-s}^2}{41.6668 \text{ ft/seg} * 32.17 \text{ lbm-ft/lbf-s}^2}$$

$$\Delta P_{h,G} = 6.1057 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.2204 \text{ pulgadas H}_2\text{O})$$

b.2.3 Para soporte de sólidos

$$G_s \text{ g/L}$$

$$\Delta P_{h,s} = \frac{G_s \cdot g_c}{V_s}$$

$$0.3121 * 32.2 * 13.872$$

$$\Delta P_{h,s} = \frac{10.0334 * 32.17}{20.8334 * 32.17}$$

$$\Delta P_{h,s} = 1.0163 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (0.040 \text{ pulgadas H}_2\text{O})$$

entonces la caída de presión total en el tramo vertical es

$$\begin{aligned} \Delta P_{tv} &= \Delta P_{f,G} + \Delta P_{f,s} + \Delta P_{h,G} + \Delta P_{h,s} \\ &= 21.9478 + 19.9459 + 6.1057 + 1.0163 \text{ mm H}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$\Delta P_{tv} = 49.0157 \text{ mm H}_2\text{O}$$

La ΔP total en el ramal c 2 es:

$$\begin{aligned} \Delta P_{total c 2} &= \Delta P_{tv} + \Delta P_{th} \\ &= 132.3217 + 49.0157 \text{ mm H}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$\Delta P_{total c 2} = 181.3374 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (7.13 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

Ahora procederemos a calcular las pérdidas para los ramales 2 3 y 3 4 usando el mismo procedimiento anterior:

ramal	v	O	Q	$\Delta P_{f,G}$	$\Delta P_{f,s}$	ΔP_{total}
	m / s	m m	m ³ /h	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O
2 3	17.2204	203.2	2006.447	57.5869	35.052	92.6389
3 4	18.2188	279.4	4019.963	3.8049	1.318	5.1232

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{c,2} + \Delta P_{2,3} + \Delta P_{3,4}$$

$$= 181.3374 + 92.6389 + 5.1232$$

$$\Delta P_{total} = 279.0995 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (10.98892 \text{ pulgadas de H}_2\text{O})$$

3.1.1 Elemento filtrante

Una vez determinada la caída de presión en los ductos y el volumen necesario para el sistema procederemos a dimensionar el filtro colector de polvo, procedemos a determinar la velocidad efectiva de filtración (V_{ef})

$$V_{ef} = V_{fn} * A * T * P * D$$

Entonces, para nuestro diseño buscamos la V_{fn} correspondiente para un polvo fino de jabón en la columna de limpieza por pulse jet (pulso a chorro) observamos un valor de 9 ft/min, luego comparamos el tipo de factor de aplicación para la cual es diseñado el colector de polvo, obteniendo un valor constante de 0.9, para el factor de temperatura, nuestro colector no trabajará con aire caliente, sino más bien es a temperatura ambiente, por lo tanto el valor del factor de temperatura es 1.0, para el factor de tamaño de partícula, si consideramos solamente la colección de partículas para aproximadamente 90 micrones que fue la hipótesis al inicio de nuestro diseño, tenemos un valor de 1.1, ahora falta el factor de carga de polvo, en nuestro diseño se estimó para una

carga de 360 gr/ m³ (10.2 gr/f³) lo cual tenemos un factor de 1.2.

Con todos los factores anotados anteriormente, encontramos que:

$$V_{ef} = 9 \text{ ft/min} * 0.9 * 1.0 * 1.1 * 1.2$$

$$V_{ef} = 0.0543 \text{ m/s} \quad (10.6920 \text{ ft/min})$$

$$Q = A * V$$

$$4019.963 \text{ m}^3/\text{h} = A * 0.0543 \text{ m/s}$$

$$1.1167 \text{ m}^3/\text{s} = A * 0.0543 \text{ m/s}$$

$$A = 20.5646 \text{ m}^2$$

$$A = n At$$

$$20.5646 \text{ m}^2 = n * 2 * r * L$$

$$20.5646 \text{ m}^2 = n * 2 * 0.065 \text{ m} * 2.420 \text{ m}$$

$$n = 20.8071 \text{ mangas}$$

Ahora observamos que nos da un valor de 20.8071 mangas, para cumplir con nuestros requerimientos necesitaremos de 21 mangas. En este momento se tiene que seleccionar el tipo de manga a utilizar para nuestro tipo de colección de partículas, por lo cual observamos las distintas cartas técnicas de diferentes tipos de telas filtrantes de la cual se deduce que la de Polipropileno es la más adecuada para nuestro sistema que es a temperatura ambiente y no sobrepasa la temperatura máxima de operación que es de 75°C para este tipo de tela en particular, también observamos el factor de permeabilidad que tiene un valor de 20 a 35 cfm ó su equivalente de 300 - 465 m³/m²/h a 10 mm H₂O de caída de presión.

La caída de presión producida por el filtro colector es igual a:

$$\Delta P = S * Vf$$

$$\Delta P = S * Vf$$



$$\Delta P = 0.5 \text{ wg/ft/min} * 10.6920 \text{ ft/min}$$

$$\Delta P = 5.3431 \text{ pulgadas de columna de agua}$$

$$\Delta P = 135.7152 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Esta caída de presión se alcanzará después de un determinado tiempo y puede disminuir si aumentamos la frecuencia de limpieza de las mangas. Para nuestro diseño procuraremos que la caída de presión se mantenga en 80 mm de agua.

Una vez seleccionado el número de mangas de acuerdo a su longitud y diámetro, procedemos a seleccionar su sistema de limpieza. Al inicio de nuestro estudio nos referimos a una V_f para un sistema de limpieza de alta presión, lo que indica que debe ser de tipo pulse jet, que usa un difusor en forma de venturi que generalmente son de Aluminio fundido y pueden venir de diferentes formas la cual usaremos la forma estándar. Esto quiere decir que para un diámetro de manga o bolsa filtrante de 130 mm, usaremos un venturi con un asiento de 142 mm, para obtener un buen asentamiento del venturi contra el espejo del colector de esta manera tenemos que dejar una holgura de 1.5 mm por lado dando como resultado una abertura en el espejo de un diámetro de 145 mm.

El arreglo seleccionado para las 21 mangas es de 4 filas * 5 columnas, siendo la columna central la que contenga 5 mangas para nuestro diseño. Con un espacio seleccionado entre centros de los agujeros de 180 mm en el espejo del filtro colector tenemos:

$$\text{ancho: } 5 \text{ filas} * 180 \text{ mm} + 180/3 = 960 \text{ mm}$$

$$\text{largo: } 5 \text{ columnas} * 180 \text{ mm} + 180/3 = 960 \text{ mm}$$

Escogeremos un diseño circunferencial por ser resistente de mejor forma a las fuerzas generadas por los esfuerzos debido a la presión negativa del sistema.

Al realizar la distribución encontramos un diámetro de 1200 mm como mínimo.

Lo siguiente es calcular el área total de la placa del espejo (foot print).

$$A \text{ foot print} = \pi / 4 * O^2$$

$$= \pi / 4 (1.20)^2$$

$$A \text{ foot print} = 1.1310 \text{ m}^2$$

Ahora necesitamos calcular la Velocidad de Pasadizo (V_c)

CAUDAL DE AIRE

$$V_c = \text{-----}$$

(Area total de placa espejo - Area total de agujero)

$$4019.963 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$V_c = \text{-----}$$

$$(1.1310 - 0.3468) \text{ m}^2$$

$$V_c = 5126.1961 \text{ m / h}$$

$$V_c = 1.4239 \text{ m / s} \quad (280.2321 \text{ ft / min})$$

De acuerdo a lo anotado anteriormente, esta velocidad de pasadizo se encuentra todavía dentro de los parámetros normales de operación para obtener una buena filtración sin producir daños en las mangas del filtro colector.

3.1.2 Ventilador

Obtenidos los valores de caída de presión por el fluido de trabajo y el material a recolectarse debido al traslado neumático por ductos y las pérdidas de presión por la tela filtrante procederemos a seleccionar el tipo de ventilador que usaremos en nuestro diseño del colector.

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{total de ductos}} + S$$

$$\Delta P_{\text{total}} = 279.0995 + 80 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\Delta P_{\text{total}} = 359.0995 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (14.1378 \text{ pulgadas de agua})$$

Volumen (ft³/min) * Presión Total (in WG)

$$HP = \frac{V \times P}{6356 \times \text{eficiencia mecánica del ventilador}}$$

$$2500 \text{ (ft}^3\text{/min) } * 14.1378 \text{ in H}_2\text{O}$$

$$HP = \frac{2500 \times 14.1378}{6356 \times 0.95}$$

$$HP = 5.85$$

En el mercado local existen motores de 5 ó 7.5 HP, por lo tanto se escoge el último.

3.1.3 Silo de Almacenamiento

A. Cálculo de los esfuerzos en el espejo del filtro colector de mangas

En nuestro diseño el sistema de limpieza de las mangas produce una presión adicional al peso combinado del espejo y de las mangas que originan esfuerzos fluctuantes que debe de soportar adecuadamente la estructura.

Asunciones:

- El espejo del filtro colector de sección circular, se lo asumirá como una plancha por unidad de longitud.
- El Esfuerzo máximo es considerado cuando es activado el sistema de soplado.
- El Esfuerzo mínimo es considerado solo el peso de la plancha que contiene a las 5 mangas completamente armadas
- Se asume que el espejo se encuentra simplemente apoyada con carga uniforme
- Se asume que debido al sistema de limpieza pulse jet se producen cargas cíclicas
- Se asume un espesor de 10 mm para el espejo

$$\begin{aligned} A_{\text{circular}} &= \pi / 4 * O^2 \\ &= \pi / 4 * (1.2)^2 \end{aligned}$$

$$A_{\text{circular}} = 1.1310 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{\text{agujero}} &= \# \text{ de mangas} * A_{\text{agujero}} \\ &= 21 * \pi / 4 * O^2 \\ &= 21 * \pi / 4 * (0.145)^2 \end{aligned}$$

$$A_{\text{agujero}} = 0.3468 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{\text{espejo}} &= A_{\text{circular}} - A_{\text{agujero}} \\ &= 1.1310 - 0.3468 \\ &= 0.7842 \text{ m}^2 \quad (8.4367 \text{ ft}^2) \end{aligned}$$

Para efectos de cálculo de esfuerzos en el espejo, tomaremos solamente la parte central del espejo que contiene a 5 mangas, en forma de un rectángulo de 1.2 metros de longitud por 0.19 m de ancho.

$$\begin{aligned} A_{\text{rectangulo}} &= b * l \\ &= 1.2 * 0.19 \end{aligned}$$

$$A_{\text{rectangulo}} = 0.228 \text{ m}^2 \quad (2.45 \text{ ft}^2)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{agujero}} &= \# \text{ mangas} * A_{\text{manga}} \\ &= 5 * \pi / 4 * (0.145)^2 \end{aligned}$$

$$A_{\text{agujero}} = 0.083 \text{ m}^2 \quad (0.888 \text{ ft}^2)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{neta}} &= A_{\text{rectángulo}} - A_{\text{agujero}} \\ &= 0.228 - 0.083 \end{aligned}$$

$$A_{\text{neta}} = 0.1450 \text{ m}^2 \quad (1.56 \text{ ft}^2)$$

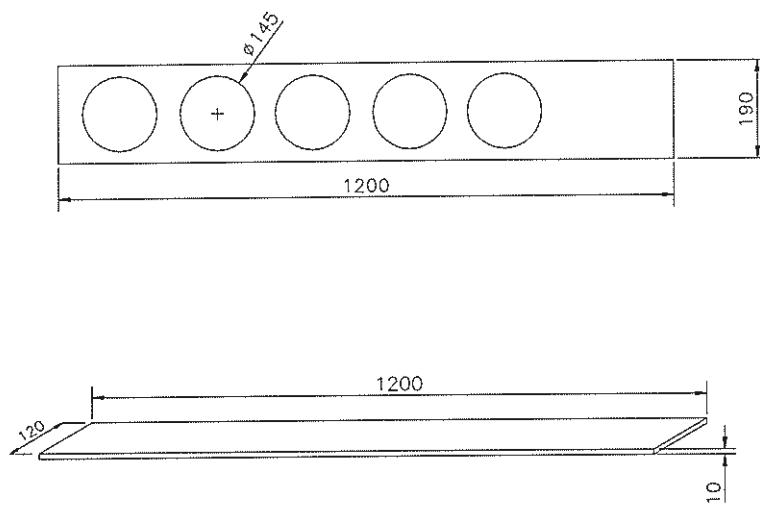


Figura 2.15 Modelo para calcular los esfuerzos presentes en el espejo del colector

$$W_{\text{neto}} = W_{\text{acero}} * A_{\text{neta}} * \text{espesor} \\ = 76.5 \text{ kN/m}^3 * 0.1450 \text{ m}^2 * 0.01 \text{ m}$$

$$W_{\text{neto}} = 110.925 \text{ N}$$

$$W_{\text{venturi}} = \# \text{ venturi} * \text{peso de venturi en aluminio} \\ = 5 * 7.84 \text{ N}$$

$$W_{\text{venturi}} = 39.2 \text{ N}$$

$$W_{\text{canastilla}} = \# \text{ canastillas} * \text{peso de canastilla de 8 alambres st\'andar} \\ = 5 * 18.62 \text{ N}$$

$$W_{\text{canastilla}} = 93.100 \text{ N}$$

$$W_{\text{tela}} = \# \text{ mangas} * \text{peso de la manga} \\ = 5 * 4.6550 \text{ N/m}^2 * 0.130 * 2.440$$

$$W_{\text{tela}} = 23.1938 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{total}} &= W_{\text{neta}} + W_{\text{venturi}} + W_{\text{canastilla}} + W_{\text{tela}} \\
 &= 110.925 + 39.2 + 93.100 + 23.1938 \quad \text{N} \\
 W_{\text{total}} &= 266.4188 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & b * h^3 \\
 \text{Inercia} &= \frac{0.12 * (0.010)^3}{12} \\
 &= \frac{0.12 * (0.010)^3}{12} \\
 \text{Inercia} &= 1.0 * 10^{-8} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w &= 266.4188 \text{ N} / 1.20 \text{ m} , \text{ carga uniformemente distribuída} \\
 w &= 222.0157 \text{ N} / \text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w * L^2 \\
 M_{\text{max}} &= \frac{(222.0157 * 1.2^2 / 8) * 10^{-3}}{8} \\
 & (\text{viga con carga uniformemente distribuida simplemente apoyada})
 \end{aligned}$$

El esfuerzo mínimo σ_{min} se producirá cuando el espejo no sufra ninguna carga cíclica producida por la activación del sistema de soplando.

$$\begin{aligned}
 M_{\text{max}} * c \\
 \sigma_{\text{min}} &= \frac{(222.0157 * 1.2^2 / 8) * 10^{-3}}{8.33 * 10^{-8}} \\
 & = \frac{(222.0157 * 1.2^2 / 8) * 10^{-3}}{8.33 * 10^{-8}} \\
 \sigma_{\text{min}} &= 19.98 * 10^6 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Una vez determinado el $\sigma_{\text{mínimo}}$, procederemos a determinar el $\sigma_{\text{máximo}}$ producido por el chorro de aire a pulso durante la secuencia de limpieza que genera un esfuerzo cortante.

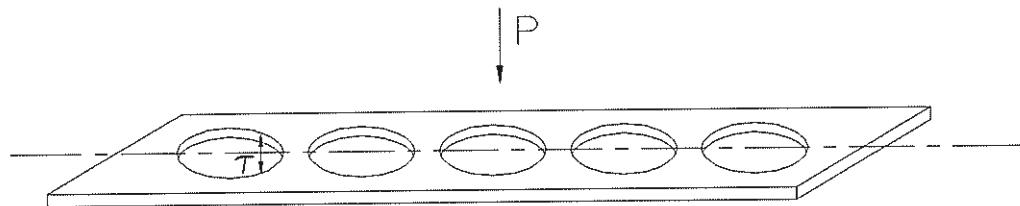


Figura 2.16 Diagrama de esfuerzos cortantes

$$\tau = 10 \text{ bares de presión de aire}$$

$$= 1.0128 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau = F/A$$

$$1.0128 \cdot 10^6 \text{ Pa} = F / (\pi \cdot O \cdot t)$$

$$1.0128 \cdot 10^6 \text{ Pa} = F / (\pi \cdot .130 \cdot 2.42 \text{ m})$$

$$F = 318.6269 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{\text{soplado}} = F \cdot \# \text{ mangas}$$

$$= 318.6269 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 5$$

$$F_{\text{soplado}} = 1.5931 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ahora la fuerza aplicada} &= W_{\text{espejo}} + F_{\text{soplado}} \\
 &= 266.4188 \text{ N} + 2068.1733 \text{ N} \\
 P &= 2334.592 \text{ N} \\
 W &= 1945.493 \text{ N/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{max}} * c & \\
 \sigma_{\text{max}} &= \frac{M_{\text{max}} * c}{I} \\
 &= \frac{(1945.493 * 1.2^2 / 8) * 5 * 10^{-3}}{8.33 * 10^{-8}} \\
 \sigma_{\text{max}} &= 175.094 \text{ } 10^6 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Nuestro material seleccionado es plancha de hierro tipo ASTM A36, la cuál tiene un:

$$\begin{aligned}
 S_y &= 248.04 \text{ } 10^6 \text{ Pa (36 000 psig)} \\
 S_{ut} &= 551.2 \text{ } 10^6 \text{ Pa (80 000 psig)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{min}} &= 19.98 \text{ } 10^6 \text{ Pa} \\
 \sigma_{\text{max}} &= 175.09 \text{ } 10^6 \text{ Pa} \\
 S_e' &= 0.5 S_{ut} \text{ (criterio de diseño)} \\
 &= 0.5 * 551.2 \text{ } 10^6 \text{ Pa} \\
 S_e' &= 275.6 \text{ } 10^6 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

$$\text{ahora, } S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S_e'$$

Debemos obtener K_a para lo cual verificamos un valor de 0.60, con un valor de $S_{ut} = 551.2 \text{ } 10^6 \text{ Pa}$ y para un acero laminado en caliente

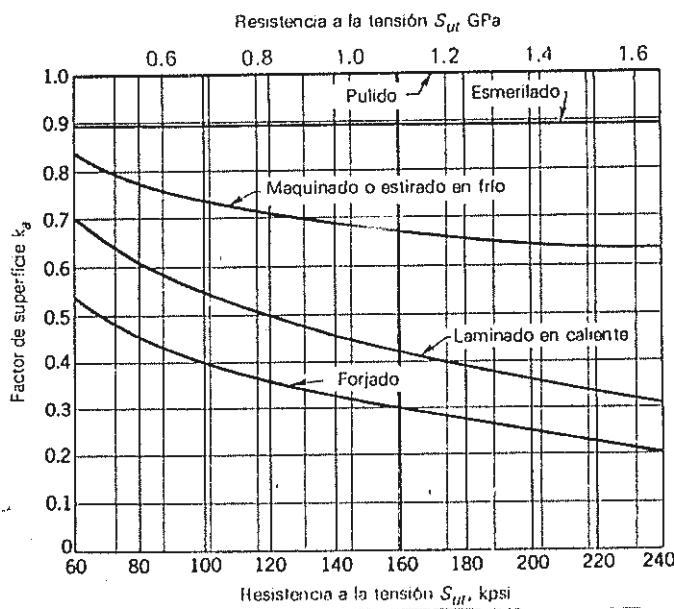


Tabla IV Factores de modificación de acabado superficial para el acero (ref. 12)

$$K_b * 0.95 A = 0.05 h b$$

$$0.95 (\pi / 4 * O^2) = 0.05 * 0.010 * 0.1905 \text{ m}^2$$

$$d^2 = 0.0001 \text{ m}^2$$

$$d = 0.0113 \text{ m}$$

con $d = 0.0113 \text{ m}$,

$$K_b = 1.189 d^{-0.097}$$

$$K_b = 0.9398$$

Se asume $K_c = 0.702$ para una confiabilidad de 0.9999

Como nuestro colector trabaja con aire a temperatura ambiente, tenemos un

$$K_d = 1.$$

Para obtener K_e , entramos a la tabla V (A26.2 de Diseño Mecánico de Shigley, ref. 12) que para una barra de sección rectangular sometida a flexión con un agujero transversal y una relación de $d/w = 145 / 190 = 0.76$ y $d/h = 145/10 = 14.5$, se obtiene un $K_t = 1.14$.

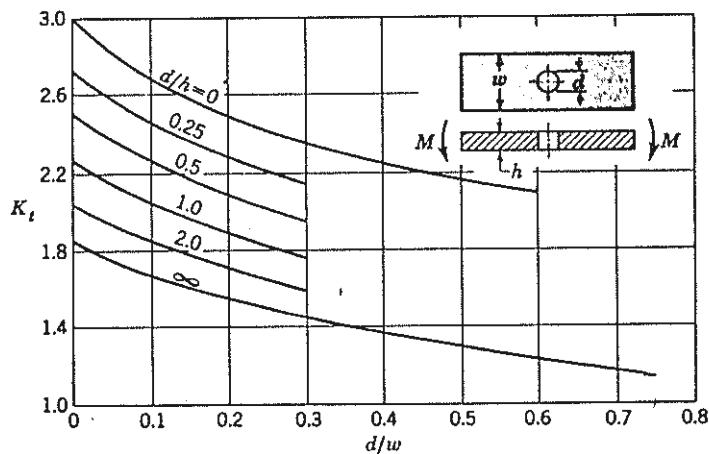


Tabla V Diagramas para factores teóricos de concentración de esfuerzo K_t (ref. 12)

De la tabla VI (fig. 7-19 de Diseño Mecánico de Shigley), obtenemos que para un radio de ranura de 4.0640 mm (0.16 pulg). y para un acero recocido con dureza Bhn < 200, tenemos una sensibilidad a las ranuras $q = 0.95$.

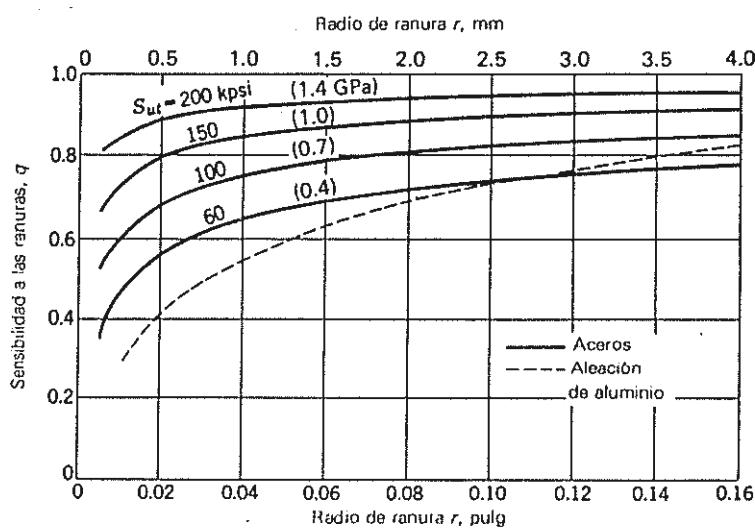


Tabla VI Diagrama de sensibilidad a las ranuras para materiales en torsión invertida alternativamente (ref. 12)

La sensibilidad a las ranura (q) se define como:

$$kf - 1$$

$$q = \frac{1}{kt - 1}$$

$$(kf - 1)$$

$$0.95 = \frac{1}{(1.14 - 1)}$$

$$(1.14 - 1)$$

$$0.133 = kf - 1$$

$$kf = 1.133$$

$$1$$

$$Ke = \frac{1}{kf}$$

$$1$$

$$= \frac{1}{1.133}$$

$$1.133$$

$$Ke = 0.8826$$

Se asume Kf un valor igual a la unidad (1), entonces tenemos:

$$Se = Ka * Kb * Kc * Kd * Ke * Kf * Se'$$

$$= 0.60 * 0.9398 * 0.702 * 1 * 0.8826 * 1 * 275.6 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$Se = 96.2868 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$$

tenemos que $\sigma_{\text{medio}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$

$$(1.4454 \cdot 10^{10} + 13.3263 \cdot 10^6) \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{medio}} = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2}$$

$$\sigma_{\text{medio}} = 7.2337 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Procederemos a realizar el diagrama de Goodman para saber si nuestro diseño puede fallar por fatiga

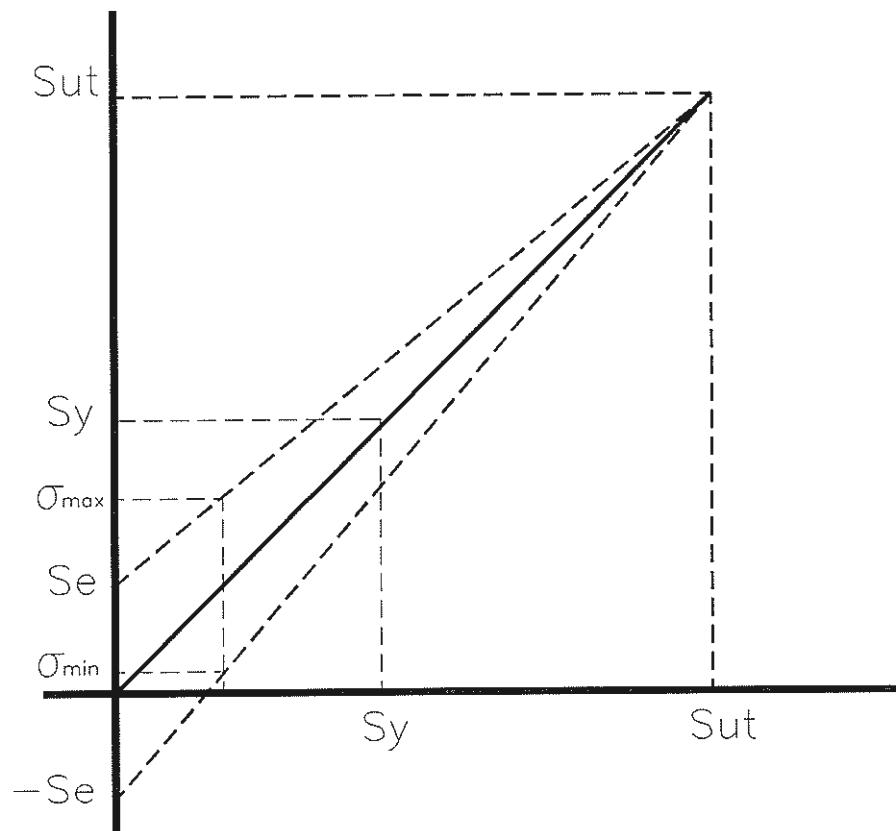


Figura 2.17 Diagrama de Goodman Modificado para nuestro colector de mangas

Como podemos comprobar, $\sigma_{\text{max}} < S_y$, entonces el elemento mecánico no fallará por fatiga.

B. Cálculo del esfuerzo que se ejerce en los apoyos

Para esto tenemos que determinar:

$\gamma_{acero} = 76.5 \text{ kN/m}^3$ perteneciente a un acero ASTM A36.

$$\begin{aligned} W_{venturi} &= 7.84 \text{ N} * \# \text{ mangas} \\ &= 7.84 \text{ N} * 21 \end{aligned}$$

$$W_{venturi} = 164.64 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} W_{canastilla} &= 18.62 \text{ N} * \# \text{ mangas} \\ &= 18.62 \text{ N} * 21 \end{aligned}$$

$$W_{canastilla} = 391.02 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} W_{tela} &= 550 \text{ gr/m}^2 * \# \text{ mangas} * (2 * r * l) \\ &= 550 \text{ gr/m}^2 * 21 * (2 * 0.065 * 2.42) \end{aligned}$$

$$W_{tela} = 111.87 \text{ N}$$

$$W_{espejo} = (V_{placa circular} - V_{\# agujeros}) * \gamma_{acero}$$

$$\begin{aligned} &= (\frac{\pi}{4} (1.2)^2 - 21 * \frac{\pi}{4} * (0.130)^2) * 0.01 * 76.5 \text{ kN/m}^3 \\ &= 651.9602 \text{ N} \end{aligned}$$

$$W_{plenum limpio} = \pi * O * t * h * \gamma_{acero}$$

$$\begin{aligned} &= 3.1416 * 1.20 \text{ m} * 0.0048 * 330.0984 * 76.5 \text{ kN/m}^3 \\ W_{plenum limpio} &= 456.96 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$W_{plenum sucio} = \pi * O * t * h * \gamma_{acero}$$

$$= 3.1416 * 1.2 * 0.0048 \text{ ft} * 2.42 * 76.5 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{plenum sucio} = 3350.0414 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 W_{tolva} &= V_{cono\ troncado} \\
 &= A_{lateral} * t \\
 &= \pi * s (r+r') * t, \quad s = \{ (r-r')^2 + h^2 \}^{0.5} \\
 &= \pi * 0.3266 \text{ m} (0.60 + 0.1050) * 0.0048 \\
 &= 0.0035 \text{ m}^3 * 76.5 \text{ kN/m}^3 \\
 &= 267.75 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Nuestro diseño, también consideraremos que para las condiciones de trabajo la tolva tenga una capacidad de almacenamiento del 100 % de acumulación de polvo por factores de seguridad en el manejo de material.

$$\begin{aligned}
 V_{tolva} &= 1/3 * h (r^2 + r * r' + r'^2) \\
 &= 1/3 * 0.95 (0.6^2 + 0.6 * 0.105 + 0.104^2) \\
 &= 1/3 * 3.1416 * 0.95 \text{ m} * 0.434 \text{ m}^2 \\
 V_{tolva} &= 0.4318 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{polvo} &= V_{tolva} 100\% \text{ llena} * \rho_{polvo} \\
 &= 0.4318 \text{ m}^3 * 911.5 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$W_{polvo} = 3940 \text{ N}$$

Ahora determinamos el peso total que debe de soportar nuestra estructura.

$$\begin{aligned}
 W_{total} &= W_{venturi} + W_{canastilla} + W_{tela} + W_{espejo} + W_{plenum\ limpio} + W_{plenum\ sucio} \\
 &\quad + W_{cono} + W_{polvo\ acumulado} \\
 &= (164.64 + 391.02 + 111.87 + 651.9602 + 45610.96 + 3350.04 + 267.75 \\
 &\quad + 3940) \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$W_{total} = 9334.2416 \text{ N}$$

El anterior valor es el peso estimado que debe de soportar la estructura del colector de mangas. Las dimensiones que limitan los tanques verticales medianos y pequeños se dan por tablas, estos usualmente son soportados por

columnas en compresión. De acuerdo a la tabla, nuestro O de diseño es de 1200 mm (47.2 pulgadas $>$ 42 pulgadas) lo que indica que necesitamos una estructura de 4 soportes. Para referencia de nuestros cálculos, el peso estimado será soportado por cuatro columnas, por lo que cada columna soportará $W/4$.

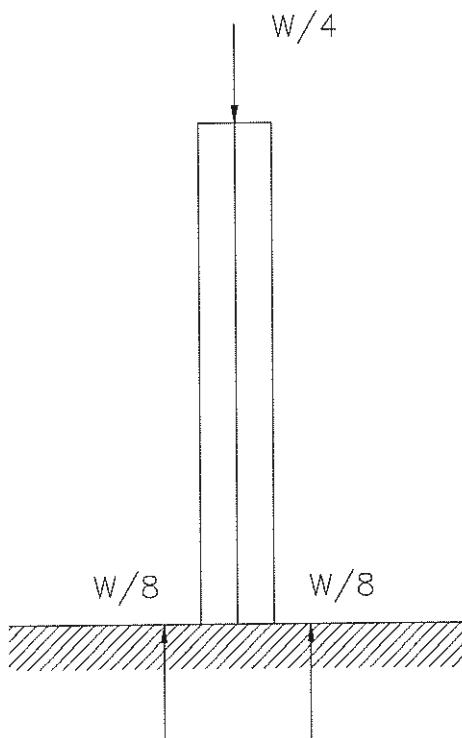


Figura 2.18 Diagrama de esfuerzos de columna en compresión

Asunciones:

- Se asume que la fuerza ejercida por el viento no influye con generación de momento de volcamiento, puesto que el área donde se encuentra ubicado el filtro es encerrado en un galpón
- Se asume que no existen cargas sísmicas de gran consideración que afecten el diseño del colector de mangas
- Se asume que el peso total del colector se distribuye en los cuatro soportes de manera equitativas por lo cual los momentos flectores se cancelan y la viga actúa básicamente en compresión con riesgo a pandeo

$$W_p = 2333.5604 \text{ N}$$

Nuestra base estructural estará conformada por columnas construidas con dos correas en "C" de 80 * 40 * 2 mm, unidas de tal forma que obtenemos una sección transversal cuadrada.

$$b * h^3$$

$$\text{Inercia} = \frac{b * h^3}{12}, \quad (\text{ref. 12})$$

$$\text{Inercia} = A k^2 \quad (\text{ref. 12})$$

$$\begin{aligned} A &= 2A_1 + 2A_2 \\ &= 2(80 * 2) + 2(76 * 2) \end{aligned}$$

$$A = 624 \text{ mm}^2$$

$$I_x = Ia_1 - Ia_2$$

$$\begin{aligned} b * h^3 - b * h^3 \\ I = \frac{b * h^3 - b * h^3}{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 80 * (80)^3 - 76 * (76)^3 \\ I = \frac{80 * (80)^3 - 76 * (76)^3}{12} = 633152 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\text{ahora } I = A k^2$$

$$\begin{aligned} I &= A k^2 \\ k &= \frac{I}{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= \frac{63352}{624} \\ k &= 100 \end{aligned}$$

$$k = 32 \text{ mm}$$

Ahora debemos verificar si nuestra columna es aplicable para columnas de Euler, en cuyo caso debe de cumplirse que:

$$\frac{l}{k} = \frac{2320}{32} = 72.5$$

$$\frac{l^2}{k} = \frac{2 * c * \pi^2 * E}{S_y} \quad (\text{ref. 12})$$

$$\frac{l}{k} = \frac{138}{1} = 138$$

$$\frac{l}{k_1} = 138 \quad y \quad \frac{l}{k} = 72.5$$

$$\frac{l}{k_1} > \frac{l}{k}, \quad \text{por lo tanto no es una columna de Euler}$$

Tendremos que usar la fórmula de Euler y Johnson:

$$P_a = \frac{S_y - b}{k^2}, \quad (\text{ref. 12})$$

$$b = \frac{1}{\frac{Sy^2}{CE} - \frac{2\pi}{}}$$

Para determinar la constante de Euler (**C**) asumimos inicialmente que la viga es empotrada

$$b = \frac{248 \cdot 10^6}{2\pi} \cdot \frac{1}{2.32 \cdot 200 \cdot 10^9}$$

$$b = 6491.31 \text{ Pa}$$

$$\text{Pa}$$

$$\frac{\text{Pa}}{A} = 200 \cdot 10^6 - 6491.31 \cdot (72.5)^2 = 165.88 \cdot 10^6$$

$$A$$

$$\text{Pa} = 103509.15 \text{ N}$$

$$\frac{\text{Pa}}{A} = 23236.75$$

$$n, \text{ es factor de seguridad, } n = \frac{\text{Pa}}{P} = \frac{23236.75}{477.36} = 48.68$$

Esto indica que la estructura no fallará por pandeo

C. Cálculo de la esclusa

La esclusa seleccionada para nuestro diseño se basa de acuerdo a los parámetros de selección y diseño técnico enunciados en la Tesis de Grado del Ing. Renán Acosta, capítulo IV donde la esclusa debe cumplir:

- Capacidad de trabajo a presión positiva o negativa
- Esclusa de servicio ligero
- Para material de buena fluidez, ligeramente corrosivo y delicado
- Construcción sencilla

Las características de la rotativa son:

- diámetro de rotor de 220 mm, 190 mm de longitud, 6 canales
- volumen de rotor 4.1 dm^3
- un motor de 3/4 HP
- la esclusa trabaja solamente a un 80 % de su capacidad
- el volumen total de la esclusa es de 3.28 dm^3 .
- una velocidad standarizada en 20 rpm, para evitar abrasión en las paredes de la misma.
- un caudal de $3.94 \text{ m}^3/\text{h}$
- un flujo mísico de 231.2 kg/h
- un diámetro de 25.4 mm, usando un factor n de seguridad de 3.63

D. Cálculo del esfuerzo de la brida de unión de la cámara limpia con la cámara sucia

El plenum limpio o cámara limpia es unida al plenum sucio o cámara sucia por medio de sujetadores roscados para dar facilidades de mantenimiento al colector de polvo.

Asumimos,

- 90% de confiabilidad
- la fuerza de separación oscila entre 0 a 150 psi
- factor de seguridad n = 4

- empaque usado es un caucho de 1/4" de espesor
- pernos seleccionados en nuestro diseño: 11 mm (7/16 pulgadas) de grado 2, donde $S_{ut} = 509.86 \text{ kN}$ (74 Kpsi) y $E = 207 \text{ GPa}$ (30 Mpsi)
- espesor de las bridas es de 10 mm en el espejo y 8 mm en la brida del plenum
- limpio

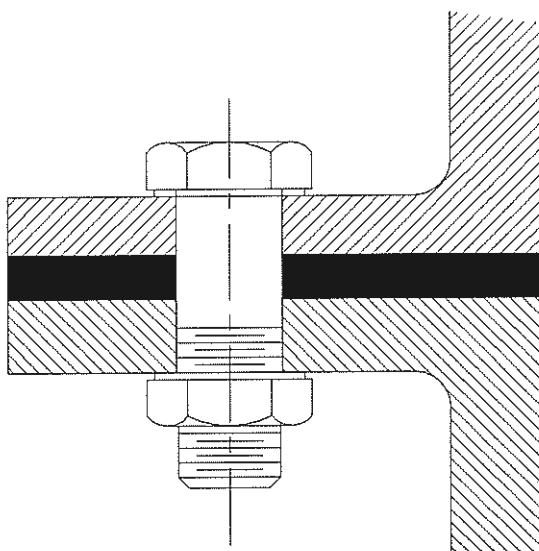


Figura 2.19 Junta entre las cámaras limpia y sucia del colector de mangas

El agarre del perno es $L = e_1 + e_2 + e_3$

$$L = 0.010 + 0.00635 + 0.008$$

$$L = 0.0244 \text{ m} \quad (0.960 \text{ pulgadas})$$

K_b , constante de rígidez del perno

$$\pi * d^2 * E$$

$$K_b = \frac{\pi * d^2 * E}{4 * L} \quad (\text{ref. 12})$$

$$4 * L$$

$$3.1416 * (0.011)^2 * 207 \cdot 10^9$$

$$K_b = \frac{4 * 0.0244}{}$$

$$K_b = 806.2259 \cdot 10^3 \text{ N/mm}$$

En nuestro colector usaremos un empaque de caucho para usarlo como junta, por lo que necesitamos obtener el módulo de elasticidad para este material, el mismo que lo obtenemos de la siguiente tabla

Material	Módulo de elasticidad, E	
	kpsi	MPa
Corcho	12.5	86
Asbesto Comprimido	70.0	480
Cobre - asbestos	13.5 (10) ³	93 (10) ³
Caucho (hule) simple	10.0	69
Rollo en espiral	41.0	280
Teflón	35.0	240
Fibra Vegetal	17.0	120

Tabla VII Módulo de elasticidad para materiales de empaquetaduras (ref. 12)

K_m, constante de rigidez de la junta

$$\pi * E * d$$

$$K_m = \frac{\pi * E * d}{}$$

$$(L + 0.5 d)$$

$$2 * \ln 5 \frac{}{(L + 2.5 d)}$$

$$(L + 2.5 d)$$

$$3.1416 * 207 10^9 * (0.011)$$

$$K_m = \frac{(0.0244 + 0.5 * 0.011)}{2 * \ln 5}$$

$$(0.0244 + 2.5 * 0.011)$$

$$K_m = 3.3807 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$$

C, relación de rígidez

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} = \frac{806.2259 \cdot 10^3}{806.2259 \cdot 10^3 + 3.3807 \cdot 10^6} = 0.1926$$

Asumo que la fuerza de separación se produce cuando se ejerce el ciclo de limpieza en la parte central del espejo del colector.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$1.0335 * 10^6 \text{ Pa} = \frac{P}{n * 3.1416 * d * t}$$

$$1.0335 * 10^6 \text{ Pa} = \frac{P}{5 * 3.1416 * 0.145 * 0.010}$$

$$P = 23.5396 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal pulg	Hilos por pulg N	Area de esfuerzo de tensión At pulg ²	Area al diámetro menor Ar, pulg ²
0	0.0600			
1	0.0730	64	0.00263	0.00218
2	0.0860	56	0.00370	0.00310
3	0.0990	48	0.00487	0.00406
4	0.1120	40	0.00604	0.00496
5	0.1250	40	0.00796	0.00672
6	0.1380	32	0.00909	0.00745
8	0.1640	32	0.00140	0.01196
10	0.1900	24	0.01750	0.01450
12	0.2160	24	0.02420	0.02060
1/4	0.2500	20	0.03180	0.02690
5/16	0.3125	18	0.05240	0.04540
3/8	0.3750	16	0.07750	0.06780
7/16	0.4375	14	0.10630	0.09330
1/2	0.5000	13	0.14190	0.12570
9/16	0.5625	12	0.18200	1.16200

Tabla VIII Características de roscas unificadas UNC (ref. 12)

De la anterior tabla de Shygley, se obtuvo que para un perno de 11 mm (7/16"), obtenemos un área de esfuerzo de tensión igual a 68.5805 mm² (0.1063 pulg²)

$$S_{ut} = 74 \text{ Kpsi}$$

$$S_e' = 19.2 + 0.314 S_{uc} \text{ para } S_{uc} \geq 60$$

$$S_e' = 19.2 + 0.314 * 74$$

$$S_e' = 42.44 \text{ Kpsi}$$

$$S_e' = 292.4116 \cdot 10^6$$

Para un 90 % de confiabilidad, $K_c = 0.897$ y de la siguiente tabla seleccionamos un $K_f = 2.2$,

Grado SAE	Grado métrico	Roscas laminadas	Roscas cortadas	Filete
0 a 2	3.6 a 5.8	2.2	2.8	2.1
4 a 8	6.6 a 10.9	3.0	3.8	2.3

Tabla IX Factores K_f de reducción de resistencia a la fatiga, para elementos roscados (ref. 12)

entonces como $K_e = 0.454$

$$S_e = K_c * K_e * S_e' \\ = 0.897 * 0.454 * 292.4116 10^6$$

$$S_e = 119.0811 10^6 \text{ Pa}$$

$$F_i = \frac{A_t * S_{ut}}{2 N} \quad \text{Sut} \\ (\text{ref. 12})$$

$$F_i = \frac{0.1926 * 4 * 23.5396 10^3}{2 N} \quad 509.86 10^6 \\ 6.858 10^{-5} * 509.86 10^6 - \frac{47.8908}{119.0811 10^6} + 1 \\ F_i = 34.966 - \frac{\text{N}}{\text{kN}}$$

De la tabla X (8-5 del libro Diseño Mecánico de Shigley), obtenemos que la carga de prueba, para un perno de grado 2 es de 378.95 MPa (55 Kpsi).

Grado SAE	Grado ASTM	Grado métrico	Diámetro nominal pulg	Resistencia a la prueba kpsi	Resistencia a la tensión kpsi	Resistencia de fluencia kpsi	Dureza Rockwell del núcleo mín/máx	Marca de grado
1	A307	4.6	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	33	60	36	B70/B100	Ninguna
2	...	5.8	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	55	74	57	B80/B100	Ninguna
		4.6	de $\frac{1}{2}$ a $1\frac{1}{2}$	33	60	36	B70/B100	Ninguna
4	...	8.9	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	65	115	100	C22/C32	Ninguna
	A449 o bien A325	8.8	$\frac{1}{4}$ a 1	85	120	92	C25/C34	Y
			7.8	de 1 a $1\frac{1}{2}$	74	105	C19/C30	Y
			8.6	de $1\frac{1}{2}$ a 3	55	90	58	...
5.1	...	8.8	No. 6 a $\frac{1}{2}$	85	120	...	C25/C40	—
			8.8	No. 6 a $\frac{1}{2}$	85	120	...	C25/C40
5.2	A325 Tipo 2	8.8	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	85	120	92	C26/C36	—
7.8	...	10.9	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	105	133	115	C28/C34	X
8	A354 Grado BD	10.9	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	120	150	130	C33/C39	X
8.1	...	10.9	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	120	150	130	C32/C38	Ninguna
8.2	...	10.9	$\frac{1}{4}$ a 1	120	150	130	C35/C42	X
...	A574	12.9	0 a $\frac{1}{2}$	140	180	160	C39/C45	12.9
		12.9	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	135	170	160	C37/C45	12.9

Tabla X Especificaciones y marcas de identificación para pernos, tornillos, espárragos (ref. 12)

$$F_p = A_t * S_p$$

$$= 68.581 \cdot 10^{-6} * 378.95 \text{ MPa}$$

$$F_p = 25.9886 \text{ kN}$$

ahora se sugiere que la precarga se encuentre dentro del intervalo

$$0.6 F_p \leq F_i \leq 0.9 F_p$$

$$15.5931 \text{ kN} \leq F_i \leq 23.3897 \text{ kN}$$

entonces

$$47.8908$$

$$F_i = 34.966 - \frac{\text{---}}{N}, \text{ kN}$$

N

Si	N	8	6	4	3
	Fi	29	27	23	19

De nuestros resultados observamos que para $N = 3$ pernos de $7/16"$ nos encontramos con un absurdo, así que para obtener una presión de empaque razonable, los pernos nos deben ser espaciados a más de 10 diámetros de perno. La circunferencia del cuerpo del filtro o silo es de 1.2 m, lo que se obtendría :

$$1200 * 3.1416 = 3769.9112 \text{ mm} / (40 * 11 \text{ mm}) = 8.568 \text{ diámetros de perno.}$$

Esto significa que usaremos 40 pernos de 11 mm espaciados a 90 mm uno de otro para asegurar una correcta presión de empaque. La parte Superior del plenum limpio se asume igual procedimiento y obtenemos igual número de pernos.

D. Cálculos de las uniones soldadas

En el proceso de construcción del colector de mangas, deberemos usar el proceso de unión de soldadura de tipo eléctrica por su versatilidad en el trabajo. En la estructura del colector de mangas encontraremos dos tipos ordinarios de uniones soldadas, las mismas que se conocen por soldadura a tope y soldadura en ángulo.

Las planchas o material base para uniones a tope pueden ser biceladas, no biceladas o biceladas a un solo lado. Cuando no hay refuerzo la práctica usual es formar el cordón y luego mecanizarlo con una moladora hasta la obtención de una superficie pareja y libre de defectos.

Se considera como área total el producto de la longitud de la soldadura por el espesor de la chapa más delgada que se unen, luego:

F

$$St = \text{-----} \quad (\text{ref. 12})$$

$$t * Lc$$

Los intentos para determinar la distribución del esfuerzo en la soldadura en ángulo o de filete transversal utilizando los métodos de elásticidad no han sido muy exitosos. La práctica común en el diseño de soldaduras, siempre ha sido basar el tamaño de la junta en la magnitud del esfuerzo en el área de la garganta y en la dimensión mínima de la anchura del cordón conformada por dos catetos iguales. Es decir que la sección del cordón representa a un triángulo isóceles, con frecuencia los catetos son iguales al espesor de la chapa, también pueden ser menores o uno mayor que otro.

Tipo de Soldadura	Clase de Esfuerzos	coeficiente
A Topo	Tracción	0.85 k
	Compresión	0.80 k
	Flexión	0.80 k
	Torsión	0.65 k
	Cortadura	0.65 k
	Todos	0.65 k

donde k, representa la tensión admisible del material.

Tabla XI Valores de esfuerzos de tensión según el tipo de soldadura (ref. 9)

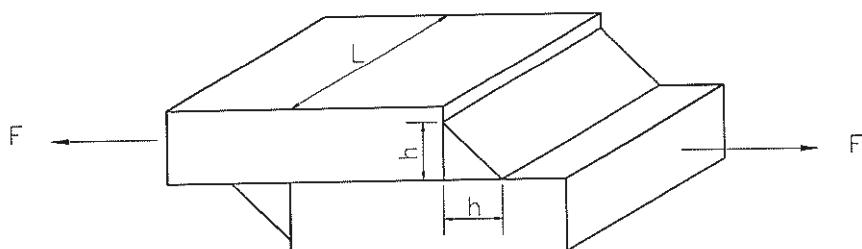


Figura 2.20 Esquema de soldadura típica transversal

El área de la garganta es $A = h * L \cos 45^\circ = 0.707 h L$. Por consiguiente el esfuerzo σ_x es:

$$\sigma_x = \frac{F}{A} = \frac{F}{0.707 h l} \quad (\text{ref. 12})$$

Este esfuerzo puede dividirse en dos componentes, un esfuerzo cortante y un esfuerzo normal σ . Sin embargo en el diseño se acostumbra basar el esfuerzo cortante en el área de la garganta y despreciar totalmente el esfuerzo normal. En consecuencia la ecuación para el esfuerzo medio es:

$$T_m = \frac{F}{0.707 h l} \quad (\text{ref. 12})$$

d.1 Para la soldadura a Tope circunferencial

$$St = \frac{F}{t * l}$$

donde para un acero A 36, obtenemos un $S_y = 248 \text{ MPa}$ (36 000 psig) y de acuerdo a la tabla anterior para una aplicación de compresión obtenemos:

$$St = 0.80 S_y$$

$$St = 0.80 (248 \text{ MPa})$$

$$St = 198.4 \text{ MPa}$$

$$St = \frac{F}{t * l}$$

F

$$198.4 = \frac{3.175 \times 10^{-3} \times 3.80}{}$$

$$F = 2394 \text{ kN}$$

d.2 Para la soldadura a tope longitudinal

F

$$St = \frac{t \times l}{}$$

F

$$198.4 \text{ MPa} = \frac{3.175 \times 10^{-3} \times 1.210}{}$$

$$F = 762.203 \text{ kN}$$

d.3 Para soldadura en ángulo del espejo contra el cilindro

F

$$T = \frac{0.707 \times l}{}$$

$$\begin{aligned} &= 0.65 \times S_y \\ &= 0.65 \times 248 \text{ MPa} \\ T &= 161.2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$F = \frac{0.707 * 3.175 * 10^{-3} * 3.1416 * 1.2}{T}$$

$$F = 1364.144 \text{ kN}$$

d.4 Cálculo del esfuerzo en el cordón entre el cuerpo del cilindro y la tolva
 Asumiremos para nuestro diseño que se comporta como un cordón en ángulo

$$F = \frac{0.65 * 248 \text{ MPa} * 0.707 * 3.175 * 10^{-3} * 3.769}{T}$$

$$F = 1363.8114 \text{ kN}$$

E. Diseño del sistema de limpieza del colector de polvo

Los controles eléctricos son usados para funciones normales de arranque y parada y además para incrementar la efectividad y eficiencia en los colectores de polvo.

Estos hacen posible automatizar la operación del sistema de limpieza, transmitir las señales de los parámetros de operación. El uso primario para los controles eléctricos en los filtros colectores es de proveer la limpieza automática en demanda de operación del filtro para mantener los niveles de caída de presión a través del mismo.

Los beneficios en la operación y limpieza son:

1. Mantener caída de presión más baja a través del filtro colector de polvo
2. Reducción en el uso del aire de manejo del sistema

3. Proveer un nivel promedio efectivo de filtración para controlar el espesor de la capa de polvo deseada
4. Reducción de la penetración de las partículas dentro del filtro colector
5. Aumento de la vida operacional del colector
6. Reducción del aire comprimido para la limpieza
7. Reducción del consumo energético, de acuerdo a las exigencias del sistema
8. Arranque del sistema de limpieza con los accesorios o equipos de descarga de material

Un control de medición de presión diferencial Photohelic proveerá la señal de inicio al sistema de limpieza del colector de polvo de acuerdo a la demanda de operación del filtro ante el diagrama de control de la polución requerida. El control Photohelic posee dos set point ajustables, uno para alta presión y otro para baja presión .

El control Photohelic viene con un contacto de salida en cada set point para controlar el sistema de limpieza en forma automática, con la particularidad de que una vez que llegue al set point inferior la frecuencia de limpieza se inicie en el último cuerpo en que finalizó la misma.

Un temporizador de estado sólido es usado para proveer un pulso eléctrico de salida a intervalos de tiempo ajustable a unas electroválvulas que a su vez se encuentran conectadas neumáticamente a unas válvulas de diafragma que liberan los chorros de pulso de aire o gas para el sistema de limpieza.

El temporizador es seteado típicamente para proveer un pulso eléctrico de 0.005 a 0.01 seg para cada ciclo. El intervalo entre ciclos durante la operación de limpieza puede ser de pocos minutos hasta una hora o más dependiendo de las características del polvo y las condiciones del proceso. Para nuestro colector usaremos válvulas de 2 vías normalmente cerradas con alimentación de 220 V que proviene de una

tarjeta eléctronica que comanda la duración de los pulsos y el tiempo entre los mismos. Las electroválvulas son conectadas neumáticamente a las válvulas de diafragma de 3/4" de desfogue rápido y estos a su vez alimentan de chorros de aire a manera de pulsos al interior de los venturis de las mangas por medio de una tubería de 3/4" de hierro negro cédula 40.

La mínima distancia permitida entre el centro de la campana de atomización de aire al venturi hasta la flauta de limpieza, depende del diámetro del agujero en el espejo, puesto que el chorro de aire en el pulso debe abarcar toda esta área por lo general se asume que el aire debe atomizarse con un ángulo de 120° con respecto al Venturi.

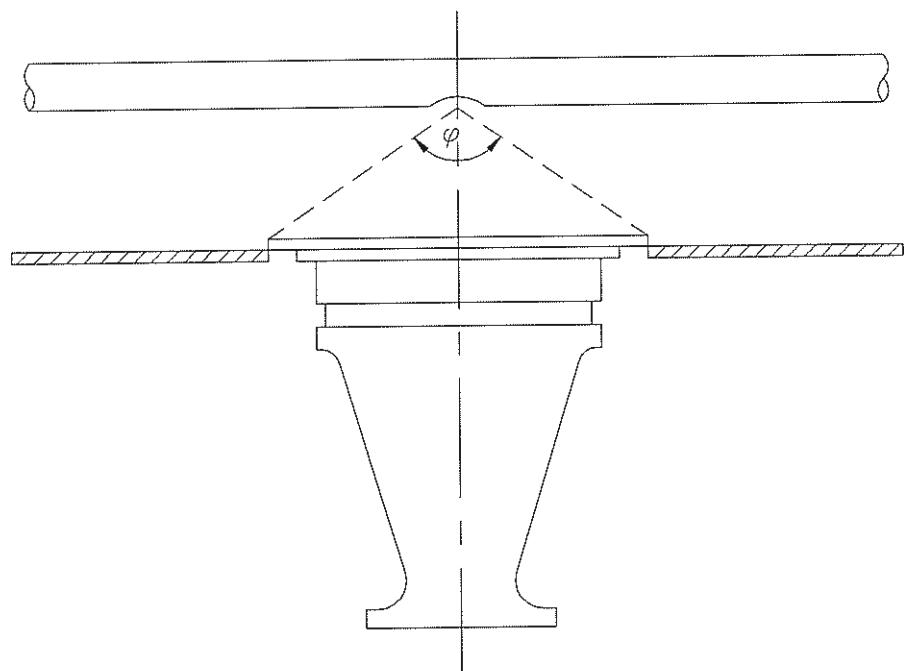


Figura 2.22 Distancia de la flauta de limpieza al espejo del colector

Escogeremos un diámetro normalizado 3/4" en la tubería o flauta de limpieza para el sistema pulse jet. Nuestro agujero en el espejo tiene un diámetro interior de 145 mm, por lo que si obtenemos el triángulo isósceles que se forma entre el venturi

y la flauta de limpieza verificamos que necesitamos un mínimo de 40 mm de separación entre los dos elementos anteriormente anotados.

3.2 CICLO DE FABRICACION DEL PROCESO

Devido a todo lo anteriormente descrito en los primeros capítulos el diseño de los colectores de polvo es realizado más de acuerdo a recursos empíricos y experimentales que a modelos matemáticos para obtener una mayor eficiencia pero todo converge a los siguientes pasos:

1. Determinar el método de colección de partículas contaminantes de acuerdo al diámetro de partículas y al grado de la eficiencia de colección que se espera alcanzar.
2. Obtención de datos generales:
 - a. material manejado
 - b. densidad del material
 - c. máxima temperatura del proceso que se requiere controlar
 - d. porcentaje de humedad en el proceso
 - e. cambio de temperatura
 - f. distribución del tamaño de partículas
 - g. características específicas del material (corrosivo, explosivo, higroscópico, abrasivo, combustible, pegajoso, tóxico o comestible, etc.)
3. Establecer los puntos de emisión de partículas desde donde se quiere colectar el polvo
4. Estimar la carga de ingreso en gramos / ft^3 para el colector
5. Determinar por medio de un esquema de tuberías y de accesorios standarizados según los principios de traslado neumático descritos en el Manual de Ventilación Industrial, 22ava edición para obtener el caudal de aire total del sistema
6. Determinar la velocidad de filtración de acuerdo a las características del material manejado y al tipo de limpieza a utilizar en el colector.
7. Determinar el número de mangas de acuerdo al diámetro y longitud que totalizan el



BIBLIOTECA
CENTRAL

área filtrante del colector

8. Determinar el tipo de fibra de las bolsas filtrantes
 - a. tipo genérico y nombre del fabricante
 - b. construcción del tejido de la fibra, unidad de peso, y permeabilidad en la limpieza
 - c. tratamiento especial de la fibra (regulada para elevadas temperaturas, silicon, teflón, grafitada)
9. Determinar el sistema de limpieza
 - a. descripción clara del método de limpieza (intermitente, automática, continua)
 - b. número de secciones de limpieza
 - c. detalles del control con temporizador
 - d. ciclo de limpieza, mínimo y máximo
 - e. intervalo de limpieza, mínimo y máximo
 - f. período de limpieza, mínimo y máximo
 - g. control de la intensidad de la limpieza
10. Determinar la distribución de las mangas según el diseño por la presión que maneje el proceso y de acuerdo a la forma de alojamiento de las mangas (circular o cuadrada)
11. Determinar la velocidad de pasadizo o velocidad de cam del colector de polvo
12. Determinar la caída de presión a través del medio filtrante y del sistema
13. Determinar las dimensiones físicas del colector de polvo
14. Determinar detalles de construcción:
 - a. ángulo de descarga de la tolva
 - b. capacidad de retención de polvo en la tolva
 - c. materiales usados y espesores
 - d. clasificación NEMA para motores y controles
15. Determinar el componente auxiliar de las descargas del material
16. Se determina la localización del colector de polvo

a. instalación exterior

- a.1 diseño por cargas de viento y de nieve (si fuese el caso)
- a.2 diseño a pruebas de agua
- a.3 diseño bajo carga sismica

b. instalación interna

- b.1 diseño abierto o encerrado
- b.2 diseño bajo cargas sismicas

17. Determinar las necesidades requeridas

a. suministros eléctricos

- a.1 número, tipo y caballos de potencia de los motores
- a.2 características de operación del temporizador
- a.3 características de voltage, fase y frecuencia
- a.4 promedio de consumo energético

b. suministro de aire

- b.1 presión de aire comprimido
- b.2 calidad del aire comprimido
- b.3 cantidad de la instalación de aire comprimido

18. Instalación del colector

a. peso del colector

- a.1 peso en el embarque
- a.2 peso en la instalación
- a.3 peso del componente más largo del ensamble

b. diagrama de montaje

c. tiempo de montaje

- c.1 mano de obra total
- c.2 herramientas requeridas

19. Modificacines y accesorios

20. Puesta a punto en sitio

3.2.1 elaboración del diagrama PERT

01. Obtener la granulometría del material
02. Obtener datos generales del polvo a colectar
03. Obtener los puntos en los cuales se controlará las emisiones
04. Determinar los caudales necesarios y presiones de aire manejados en el sistema
05. Determinar el área de filtración, el número de mangas, diámetro, longitud y caída de presión del colector de polvo
06. Diseño de la unidad filtrante
07. Construcción del ventilador de acuerdo a caudal y presión del sistema
08. Rolada del plenum sucio y plenum limpio
09. Construcción del espejo del colector
10. Unión del plenum o cámara sucia con el espejo del colector
11. Construcción de la brida y tapa superior del plenum limpio
12. Unión del plenum limpio con el espejo del colector
13. Rolada de la tolva de descarga del material
14. Construcción de canastillas
15. Fundición de los venturis
16. Armar canastillas con sus respectivas mangas
17. Unión de la tolva con el plenum o cámara sucia y limpia del colector de polvo
18. Construcción de los soportes de la estructura
19. Preparar empaque para las cámaras sucia y limpia del colector
20. Construcción del sistema de limpieza del colector
21. Construcción de la válvula rotativa
22. Montaje de la unidad

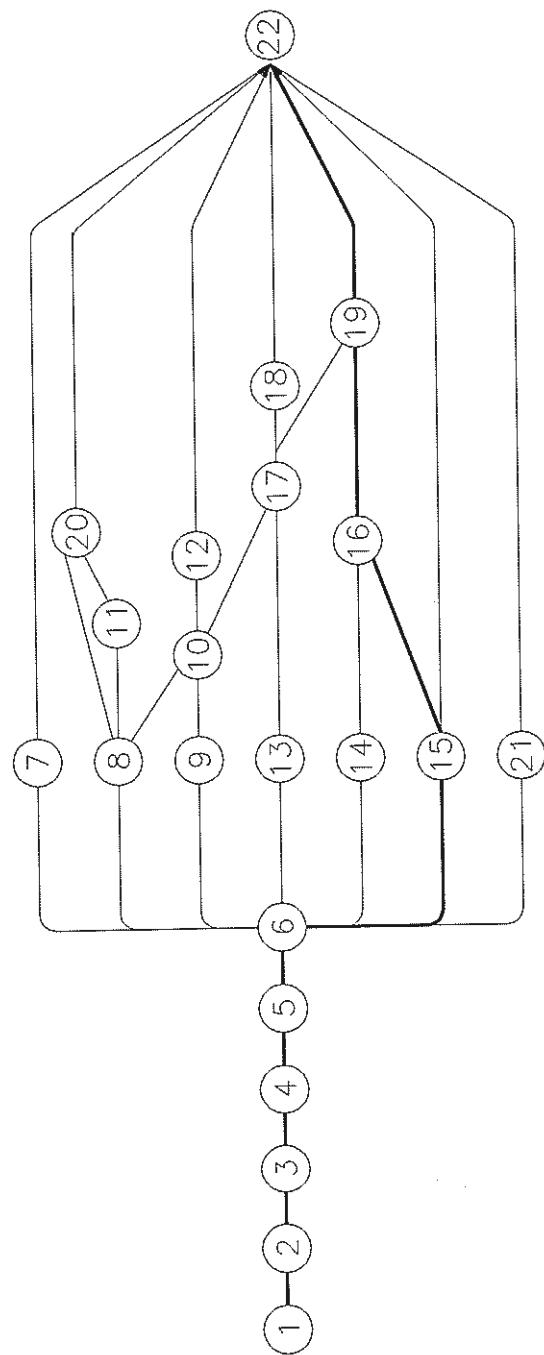


Figura 2.22 Diagrama Pert del ciclo de fabricación del colector de Polvo

3.3 Montaje y puesta a punto

3.3.1 Diagrama PERT del montaje y puesta a punto

Una vez finalizado el ciclo de fabricación del colector de mangas procederemos a determinar las actividades necesarias para el traslado del mismo al sitio de trabajo.

Actividad

01. Traslado del plenum o cámara sucia y limpia del taller al lugar del montaje
02. Desconexión eléctrica de los accesorios del anterior colector de mangas
03. Desmontaje de las líneas de aspiración del filtro colector saliente
04. Desmontaje del colector de polvo de flujo reverso
05. Montaje del plenum limpio y tolva en el lugar de trabajo
06. Anclaje de la estructura al pavimento
07. Montaje del ventilador centrífugo del nuevo sistema de aspiración
08. Unión de la cámara limpia con la cámara sucia mediante sujeción de pernos y empaque intermedios
09. Construcción de la línea de entrada al colector de mangas
10. Construcción de la salida del colector y entrada al ventilador
11. Montaje de la línea de entrada al colector
12. Montaje de la línea de salida del colector
13. Colocación de mangas en el interior del cuerpo del colector de polvo
14. Conección eléctrica del ventilador de aire de proceso
15. Instalación del sistema de limpieza
16. Montaje de la válvula de descarga del material
17. Montaje de las líneas de aspiración en los nuevos puntos de captura de emisiones de polvo.

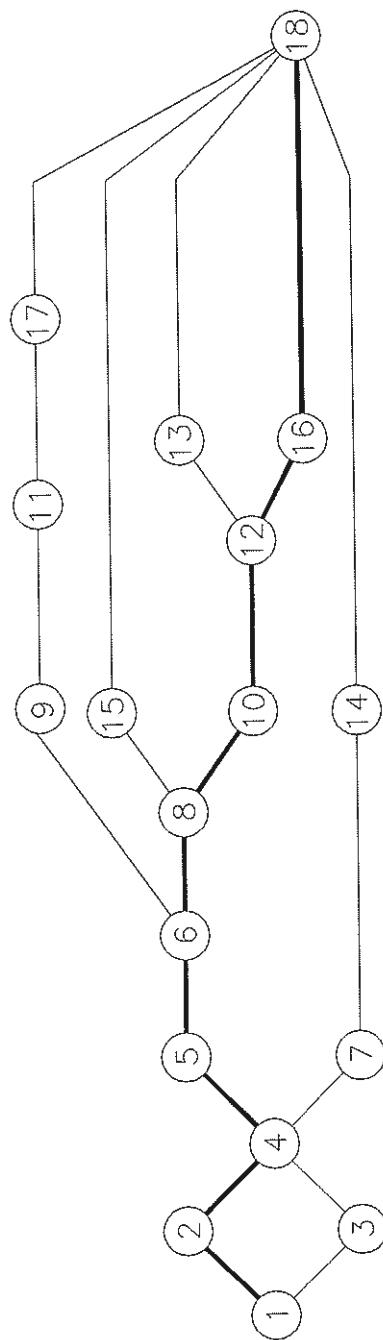


Figura 2.23 Diagrama Pert de montaje y puesta a punto

CAPITULO IV

ANALISIS DE COSTO Y FACTILIDAD EN EL DISEÑO

4.1 COSTOS EN EL DISEÑO

Muchas aplicaciones en procesos determinados en la industria determinan el sistema de filtración de contaminantes que son analizados por factores de conveniencia y factores de seguridad. La existencia de polvo explosivo o polvo de productos químicos obviamente es un problema de seguridad.

En el diseño de un colector de mangas, los costos significativos se reducen a la adquisición de la tela filtrante, puesto que según la aplicación se escoge el tipo de la fibra, y por lo general esta es de importación de aquellos países que se encuentran utilizando estos equipos de control de la contaminación para sus diversos procesos desde hace años atrás donde las normas de Seguridad que regulan los límites máximos permisibles de contaminantes al medio ambiente cada vez se vuelve más estricta. Los Estados Unidos, Inglaterra, Chile y ahora nuestro vecino país Colombia figuran como posible proveedores de los diversos tipos de tela filtrante para la construcción de colectores de polvo.

A continuación analizaremos los costos relacionados en el diseño del colector de mangas enfocado a normas de Seguridad y por conveniencia en el reprocesso del polvo. Antes del reemplazo del colector de mangas de aire reverso, por un colector nuevo tipo pulse jet, teníamos un nivel de contaminantes de 3434 ug/m³ que producía malestar en el área de trabajo, excesiva rotación del personal, desperdicio de la materia prima que no se podía reprocesar por contaminarse con partículas de polvo o objetos extraños y el costo elevado del funcionamiento de un equipo de control de la contaminación trabajando inefficientemente. Los costos involucrados en la construcción del colector de polvo los dividiremos en:

- costos de material

a.3 Costos de la adquisición del Ventilador

El diseño del ventilador no es tópico de este proyecto, así que fué seleccionado con una referencia de 2500 cfm, 14 pulgadas de agua de presión estática, 3500 rpm, de aletas rectas y alta eficiencia marca "CICLON", con un motor eléctrico acoplado de 10 HP.

costo total	s/ 7 000 000,ºº	(2 222 \$)
-------------	-----------------	-------------

b. Costos de Mano de Obra

En lo referente a los costos de mano de obra calificada, está demás de mencionar que es una gran ventaja para nuestro país en la construcción de estos equipos de control de la contaminación que en aquellos países desarrollados que involucran actividades que encarecen al producto final.

Nuestros costos se relacionan básicamente a trabajos de soldadura eléctrica, rolada de planchas A36 en la construcción del plenum o cámara limpia y del plenum o cámara sucia, construcción de las canastillas tipo standar, fundición y maquinación de venturis y en la construcción del espejo del colector de polvo.

costo total	s/ 2 873 884,ºº	(912 \$)
-------------	-----------------	-----------

c. Costos de las Mangas

El costo más significativo en el diseño del colector es la tela filtrante, pues depende como lo hemos analizado anteriormente de factores como temperatura del aire del proceso, tamaño y tipo de material a colectar, etc. y adicionalmente se le añade un costo indirecto, que es el del tiempo de obtención de la tela de los países proveedores.

De la experiencia obtenida en el manejo de costos colectores de polvo debe de analizarse muy detalladamente el factor de tiempo de suministro de las mangas que a continuación presenta:

país	tiempo de entrega	Proveedor	tipo de entrega
Colombia	2 - 3 semanas	Textiles Industriales	bajo pedido
Chile	3 - 4 semanas	Ricotex	bajo pedido
Estados Unidos	6 - 8 semanas	B.H.A. Group	bajo pedido
Inglaterra	8 - 16 semanas	P & N National	bajo pedido

En nuestro diseño del colector de polvo, solicitamos las 21 mangas más 5 de repuesto a la compañía B.H.A. Group, asentada en los Estados Unidos, los mismos que han sido asesores técnicos externos en el diseño de esta unidad filtrante.

costo de 26 mangas de 5 " * 116 ", REDI, Polipropileno PPO1

costo unitario por manga \$ 8.28 USD

costo total \$ 215.28 USD

Obtenidos todos los costos directos relacionados en nuestro diseño, procederemos a realizar la sumatoria respectiva de todos los items (consideraremos el tipo de cambio en 1 USD = 3150 sucrens)

costos de material s/ 11 248 456,ºº (3570.99 USD)

costos de mano de obra s/ 2 873 884,ºº (912.34 USD)

costos de las mangas s/ 678 132,ºº (215.28 USD)

costo de la inversión s/ 14 800 472,ºº (4698.56 USD)

El costo de la inversión fué de 4 698.56 USD ó s/ 14' 800 472,ºº en moneda local.

Nuestro colector después de los ajustes del ciclo de limpieza, mantuvo un nivel de emisiones de 827 ug/m³, es decir:

carga de polvo colectada

eficiencia de colección = ----- * 100

ingreso de carga de polvo

de aire de proceso y entonces:

a. colector de polvo aire reverso

$$\text{nivel de emisiones} = 3434 \text{ ug/m}^3 (9.731 * 10^{-5} \text{ gr/ft}^3)$$

$$9.06 \text{ gr/ft}^3 - 9.731 * 10^{-5} \text{ gr/ft}^3$$

$$\begin{aligned} \text{eficiencia colección} &= \frac{9.06 \text{ gr/ft}^3}{9.06 \text{ gr/ft}^3} * 100 \\ &= 99.99892 \% \end{aligned}$$

b. colector de polvo pulse jet

$$\text{nivel de emisiones} = 827 \text{ ug/m}^3 (23.436 \text{ ug/ft}^3)$$

$$9.06 \text{ gr/ft}^3 - 2.3436 * 10^{-5} \text{ gr/ft}^3$$

$$\begin{aligned} \text{eficiencia emisiones} &= \frac{9.06 \text{ gr/ft}^3}{9.06 \text{ gr/ft}^3} * 100 \\ &= 99.99974 \% \end{aligned}$$

Si comparamos ambos filtros de acuerdo a la eficiencia de colección, observamos claramente que el nuevo colector de polvo instalado no sólo ha disminuido el nivel de emisiones permisibles en el área, sino que es más eficiente para nuevos puntos de captura de polución de polvo que el anterior colector no podía manejar. Esta eficiencia del colector se encuentra dentro de los parámetros de diseño de los colectores de polvo, lo que nos garantiza que el criterio de seguridad en cuanto a emisiones de polvo contaminante es alcanzado.

El otro criterio analizado es el de conveniencia, puesto que actualmente se recuperan aproximadamente 25 kg/h de materia prima, si nuestro proceso es de 16 horas de trabajo:

	kg		sucres	
16 horas * 25	-----	*	2528	-----
	hr			kg de tripolifosfato

que en dólares obtenemos 32.10 \$ USD, lo que indica que nuestra inversión justifica su costo en apróximadamente en 146 días

4.2 FACTILIDAD DE LOS COMPONENTES

Cuando se diseña y se construye colectores de polvo de distintas dimensiones la facilidad de obtención de los componentes del mismo es mucho más sencilla, puesto que lo único que no se puede fabricar en el país es la tela filtrante, pero esta a su vez se la importaría en rollos y se procedería a construir la manga localmente, según dimensiones obtenidas para cada sistema en particular puesto que los venturis son obtenidos en base a una fundición por moldeo de Aluminio en Talleres Metáurgicos locales, las canastillas son construidas generalmente a base de alambrón galvanizado, el cuerpo del colector es de Acero A36 de fácil obtención en mercado local, el sistema de limpieza se lo puede automatizar con un sistema de PLC (Control lógico Programable) o con temporizadores que comandan a las electrovalvulas normalmente cerradas en serie y esta a su vez a las válvulas neumáticas de diafragma que generalmente son ASCO o FESTO.

Todos los componentes usados en la construcción del colector de polvo fueron adquiridos en su mayoría localmente y ciertos accesorios secundarios importados vía courier, pero esto se puede agilitar si lo obtuviéramos localmente. Esto ocurrirá si se desarrolla completamente las Políticas Ambientales del Ecuador que exigirán estrictamente el cumplimiento de los niveles permisibles de emisiones por contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos encaminando a la industria en la adquisición de estos Equipos de Control de la Polución.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La mejor manera de preservar nuestro habitat, es mediante un proceso de difusión de los tipos de equipos para el control de la polución en el sector industrial así de esta manera iniciar un cambio radical en el paradigma de la contaminación ambiental que afecta actualmente a la mayoría de los industriales del Ecuador
2. El país no debe esperar el experimentar problemas de contaminación ambiental como los ocurridos en otros países industrializados en los cuales su ecosistema ha quedado en algunos casos con daños irreversibles en su ecosistema para exigir un mejor control en sus procesos bajo la escusa de que los equipos de control de polución no agregan valor al producto final.
3. El Ecuador con la apertura de sus fronteras económicas deberá afrontar retos no sólo con precios, sinó con calidad, para lo cual tendrá que fomentar en los empresarios e inversionistas que cumplan con las normas existentes de calidad en la elaboración de sus productos, una de ellas es la nueva norma ISO 14000 que son las normas de calidad para aseguramiento del medio ambiente, norma necesaria condicionante para los productos exportables a la comunidad Europea que empezará a regir dentro de dos años.
4. La selección del equipo para control de la polución depende no solamente del tipo de proceso, sinó del límite de emisiones permisibles que se requiera obtener, las mismas que deberán de ajustarse a las impuestas por el gobierno
5. Ante un futuro desarrollo en la industria metalmecánica del país por la nacionalización de estos equipos de control de la polución, se ha comenzado a verificar incursiones en la representación local de importantes firmas fabricantes de telas filtrantes, por lo cual la elaboración de la bolsa para aplicaciones no especiales se presenta accesible.

6. La industria metalmecánica estará con la posibilidad de diseñar y construir colectores de mangas pequeños y medianos, no así para colectores de gran tamaño que involucran otro tipo de tecnología en el proceso de construcción
7. Aquellas industrias que usan transporte neumático en la movilización de sus materias primas que sean bastante contaminantes, el uso de un colector de mangas es la mejor opción para evitar polución en el medio ambiente y recuperación de contaminantes finos generados por acción de las corrientes de aire presentes durante el traslado
8. Los costos de diseño, construcción, montaje y puesta a punto de un colector de polvo son considerables al inicio, pero se justifica con la disminución de emisiones y con el aumento de recuperación de materia prima en suspensión
9. El principal inconveniente que se tiene con los colectores de polvo es la presencia de humedad en el aire de proceso, por cuanto si el material es bastante higróscopico se formará una capa superficial en la manga, la cual será dificultosa su remoción, es así que se recomienda el uso de los manómetros diferenciales de presión para activar la secuencia de limpieza de las mangas. Se tiene que considerar también que una limpieza excesiva puede causar trastornos en el tejido de la bolsa, como erosión o perforaciones.
10. En los procesos que involvren colectores de mangas, se debe poner atención en las pequeñas fugas existentes en las líneas de aspiración por cuanto pueden sobrecargar al sistema en el momento que el ventilador deba superar la resistencia al flujo adicional reduciendo de esta manera la succión en los puntos deseados en controlar las emisiones .
11. El colector de polvo que usa mangas filtrantes y que tiene como sistema de limpieza un pulso de chorro de aire es la mejor opción para el parque industrial por cuanto su principio de funcionamiento y mantenimiento es simple y de bajo costo

JABONERIA NACIONAL S.A.**PLANTA DE DETERGENTES****MEDICION DE POLVO AMBIENTAL**

TIEMPO DE MEDICION : 4 H

TOLERANCIA : 500 ug/m3

PUNTOS DE MEDICION	FECHA	W1(g)	W2(g)	V(m3)	ug/m3
ROMPESACOS	12/02/96	0.937	1.514	168	3434
PERFUMACION	06/02/96	0.9447	1.0165	130	555
ENVASADO					
PREPARACION DE BARRA	01/02/96	0.9282	0.9408	139	91
PLANTA BAJA (T-50.1)	08/02/96	0.9317	1.0029	139	512
SILOS DE POST-ADICION			,		
SILOS DE MATERIA PRIMA					
TRANSPORTADOR T-51.1					
TORNILLO T-45.6	09/02/96	0.929	1.1125	137	1339
TOLVAS DE ALIMENTACION A MAQUINAS ENVASADORAS					

w1 = peso del disco vacio en gramos

w2 = peso del disco con polvo en gramos

v = volumen aspirado en metros cubicos

calculos : $(w2-w1) * 10 / v$

OBSERVACIONES: EN ROMPESACO EL VOLUMEN ES 168 m3

'POR EL TIEMPO DE MEDICION DE 5 HR.

López
SUPERVISORES

JABONERIA NACIONAL S.A.**PLANTA DE DETERGENTES****MEDICION DE POLVO AMBIENTAL**

TIEMPO DE MEDICION : 4 H

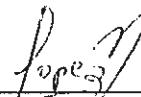
TOLERANCIA : 500 ug/m3

PUNTOS DE MEDICION	FECHA	W1(g)	W2(g)	V(m3)	ug/m3
ROMPESACOS	04-Jun-96	0.9250	1.0489	145	827
PREPARACION DE BARRA	04-Jun-96	0.9504	1.0418	132	692
ENVASADO	03-Jun-96	0.8636	0.9374	166	444
PERFUMACION	05-Jun-96	0.9281	1.0136	117	495
PLANTA BAJA (T-50.1)	03-Jun-96	0.9233	0.9860	163	384
SILOS DE POST-ADICION	05-Jun-96	0.9308	0.9752	118	376
SILOS DE MATERIA PRIMA	06-Jun-96	0.9219	1.1625	147	1636
TRANSPORTADOR T-51.1 TERCER PISO	05-Jun-96	0.9260	0.9831	143	399
TORNILLO T-45.6 BALANZAS DOSIFICADORAS	05-Jun-96	0.9213	1.0026	158	514
SECCION DE GRUMOS	04-Jun-96	0.9207	0.9760	136	406

w1 = peso del disco vacio en gramos

w2 = peso del disco con polvo en gramos

v = volumen aspirado en metros cubicos

calculos : $(w2-w1)*10 / v$ 
SUPERVISORES

APENDICES

APENDICE A

HOJA TECNICA DE UNA TELA FILTRANTE POLIESTER DE MARCA REICOTEX

ARTICULO 4031

MATERIA PRIMA	100% POLIESTER
PESO	685 GRS/M ²
DENSIDAD	25.0 HILOS / CM
ESPEJOSR	8.5 HILOS / CM
ANCHO	1.15 MM
RESISTENCIA A RUPTURA POR TRACCION	SEGUN PEDIDO
ELONGACION AL PUNTO DE RUPTURA	107.5 KG / CM
PERMEABILIDAD AL AIRE	88.0 KG / CM
(a 20 mm columna de agua)	75.0 %
ABSORCION DE HUMEDAD DE LA FIBRA	45.0 %
RESISTENCIA MEDIO ACIDO	LT / DM2 / MIN
RESISTENCIA MEDIO ALCALINO	0.3 - 0.4 %
TEMPERATURA MAXIMA DE TRABAJO	EXCELENTE
USOS	REGULAR
	150 C
	FILTROS PRENSA

APENDICE B

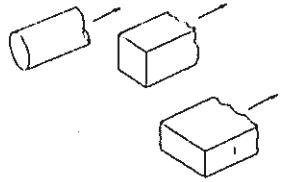
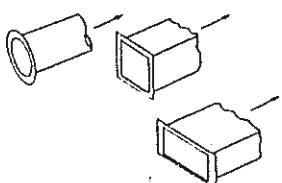
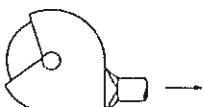
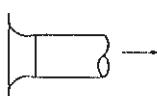
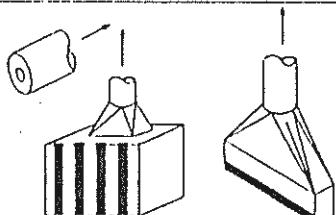
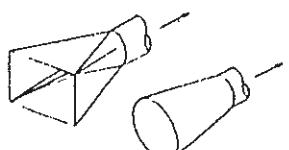
HOJA TECNICA DE TELA FILTRANTE POLIPROPILENO DE MARCA BHA GROUP

Filtration Fabric

Style:	PP001
Fiber:	100% Polypropylene
Weight:	14 oz./yd. ² 475 g/m ²
Construction:	Scrim Supported Felt
Count:	N/A
Air Permeability:	20 - 35 cfm *300-465 m ³ /m ² /h @ 10mm H ₂ O
Mullen Burst Strength:	350 psi 20 kg/cm ²
Tensile Strength: (2" strip) (5.08 cm)	
Warp Direction:	N/A
Fill Direction:	N/A
Thermal Stability:	2% maximum @ 275°F 2% maximum @ 135°C
Maximum Operating Temperature:	170°F 75°C
Finish:	Heat Set

APENDICE C

COEFICIENTES DE PERDIDAS A LA ENTRADA SEGUN EL TIPO DE CAMPANA DE EXTRACCION LOCALIZADA

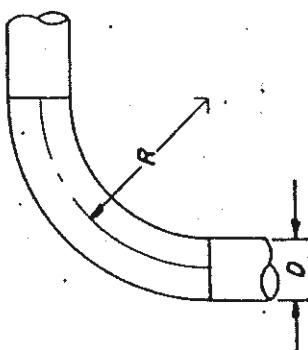
HOOD TYPE	DESCRIPTION	COEFFICIENT OF ENTRY, CE	HOOD ENTRY LOSS (F _N)
	PLAIN OPENING	0.72	0.93
	FLANGED OPENING	0.82	0.49
	TYPICAL GRINDING HOOD	0.78	(STRAIGHT TAKEOFF) 0.65
		0.85	(TAPERED TAKEOFF) 0.40
	BELL MOUTH INLET	0.98	0.04
	ORIFICE	SEE FIGURE 5-12	
	TAPER OR CONE HOOD	SEE FIGURE 5-12	

APENDICE D

COEFICIENTES DE PERDIDAS EN LOS CODOS DE RADIO LARGO

<i>R</i> , No. of Diameters	<i>Loss Fraction</i> of VP
2.75 <i>D</i>	0.26
2.50 <i>D</i>	0.22
2.25 <i>D</i>	0.26
2.00 <i>D</i>	0.27
1.75 <i>D</i>	0.32
1.50 <i>D</i>	0.39
1.25 <i>D</i>	0.55

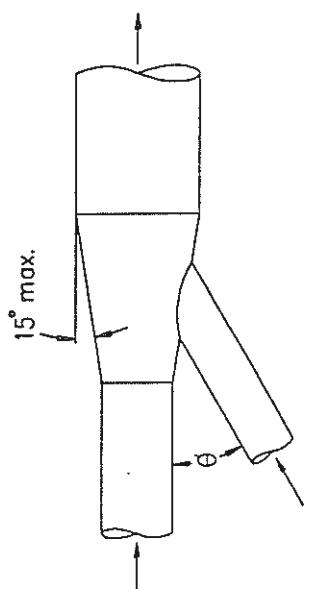
ROUND ELBOWS



APENDICE E

COEFICIENTES DE PERDIDAS A LA ENTRADA DE RAMALES

Angle θ Degrees	Loss Fraction of VP in Branch
10	0.06
15	0.09
20	0.12
25	0.15
30	0.18
35	0.21
40	0.25
45	0.28
50	0.32
60	0.44
90	1.00



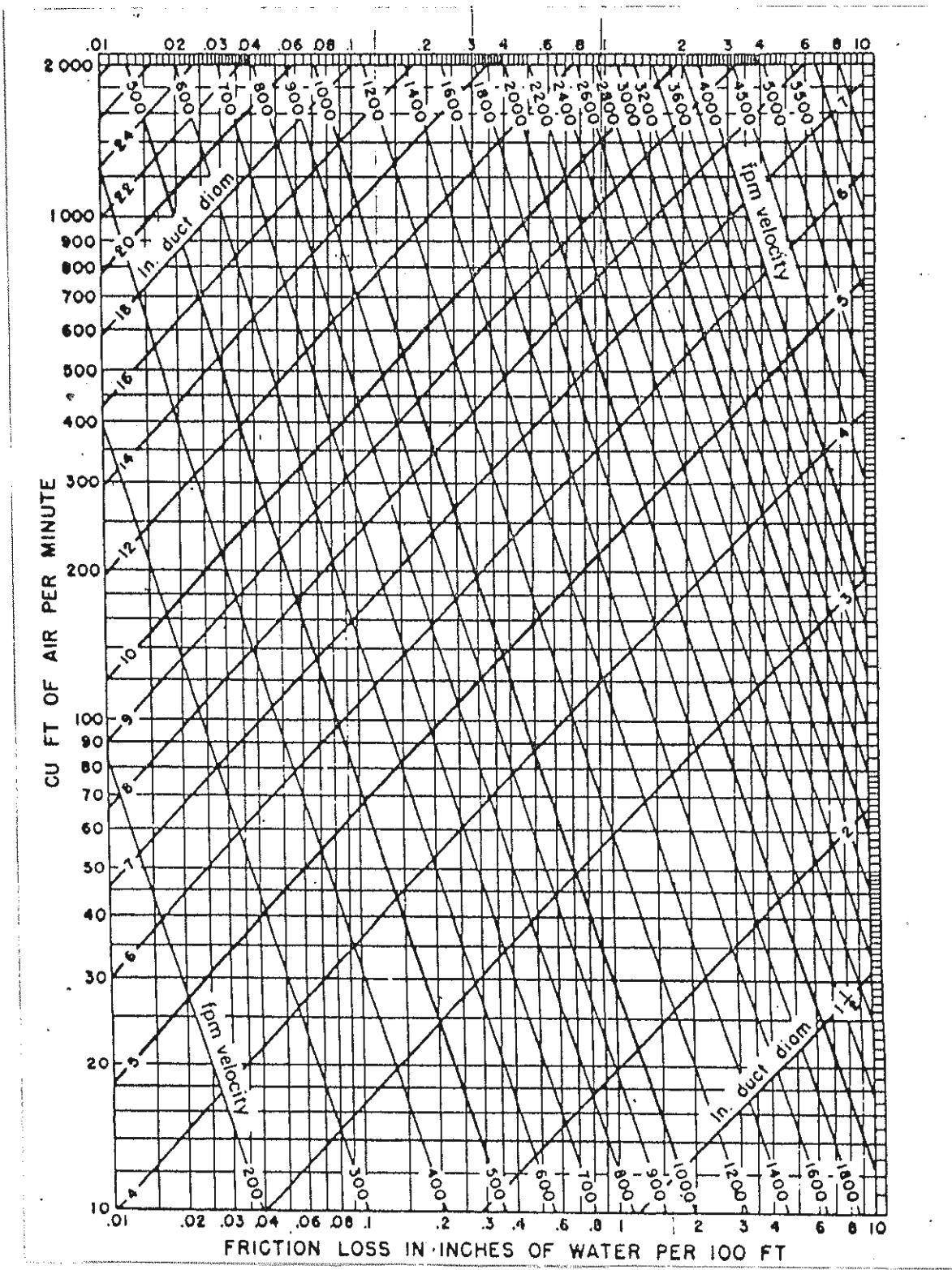
Note: Branch entry loss assumed to occur in branch and is so calculated.

Do not include an enlargement regain calculation for branch entry enlargements.

BRANCH ENTRY LOSSES

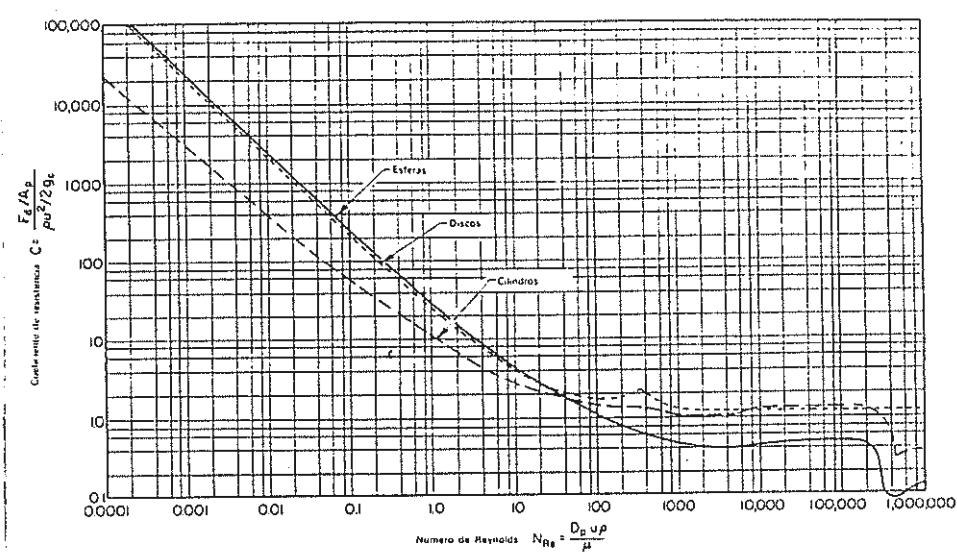
APENDICE F

PERDIDAS POR FRICTION EN PULGADAS DE AGUA POR 100 PIES DE LONGITUD

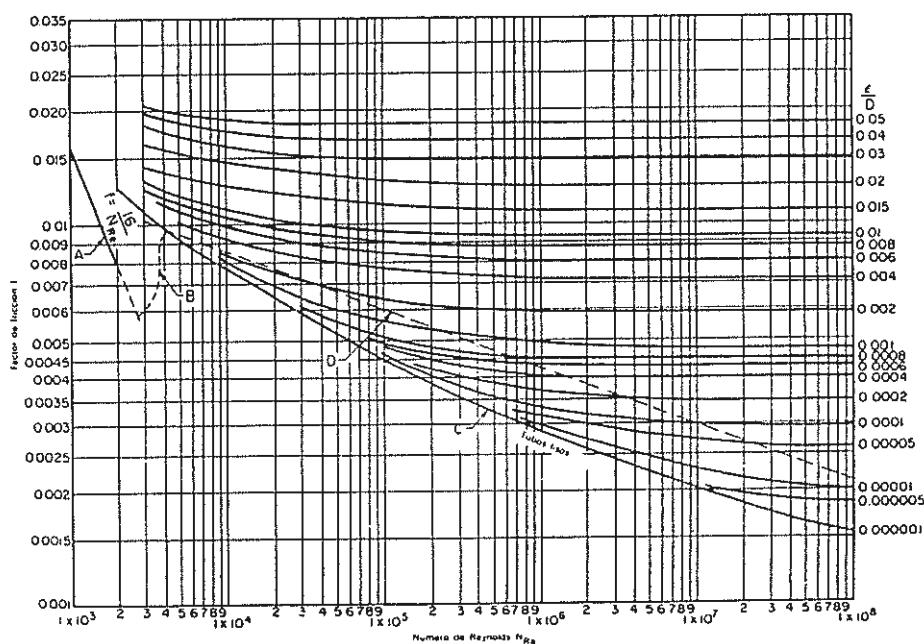


APENDICE G

COEFICIENTE DE RESISTENCIA PARA ESFERAS, DISCOS Y CILINDROS



FACTORES DE FRICCIÓN DE FANNING

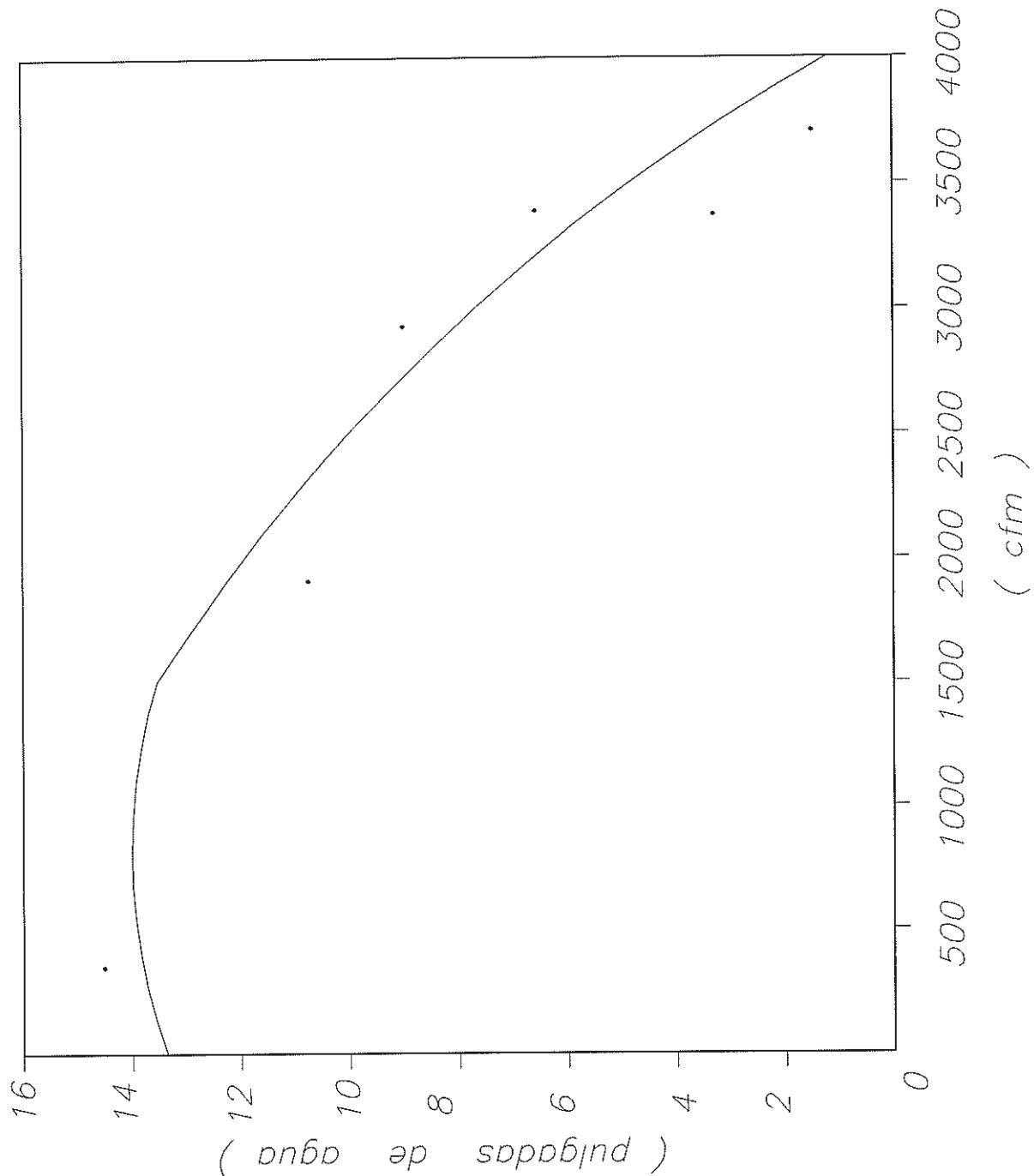


BIBLIOTECA

CENTRAL

APENDICE H

CURVA CARACTERISTICA DEL VENTILADOR



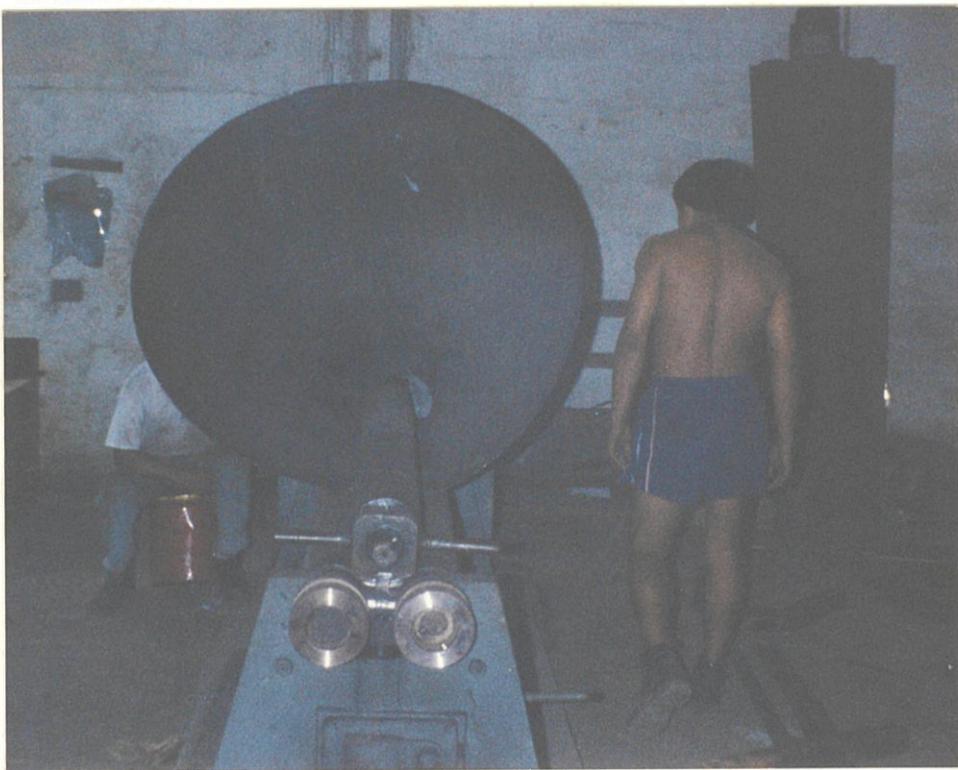
APENDICE I

CONSTRUCCION DEL CILINDRO DEL COLECTOR



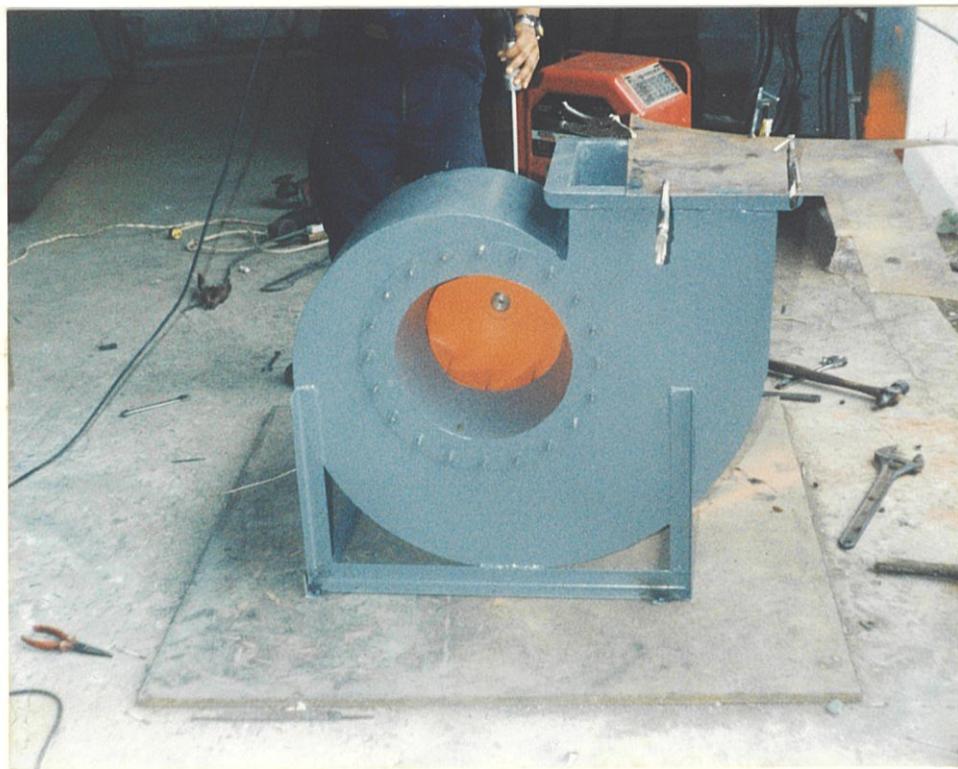
APENDICE J

ROLADA DE LA TOLVA Y VISTA FRONTAL DEL ESPEJO DEL COLECTOR



APENDICE K

BALANCEO Y MEDICION DE VIBRACIONES DEL VENTILADOR



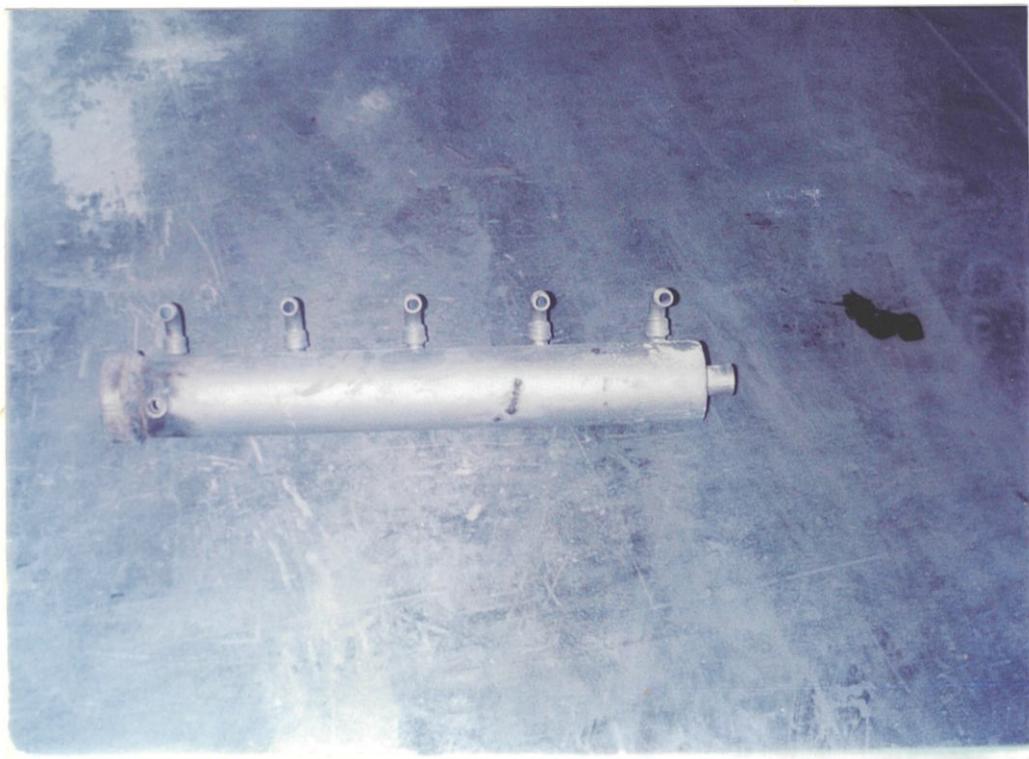
APENDICE L

VALVULA ROTATIVA DESCARGADORA DE POLVO



APENDICE M

DISTRIBUIDOR DE AIRE Y CONSTRUCCION DE LA CANASTILLA



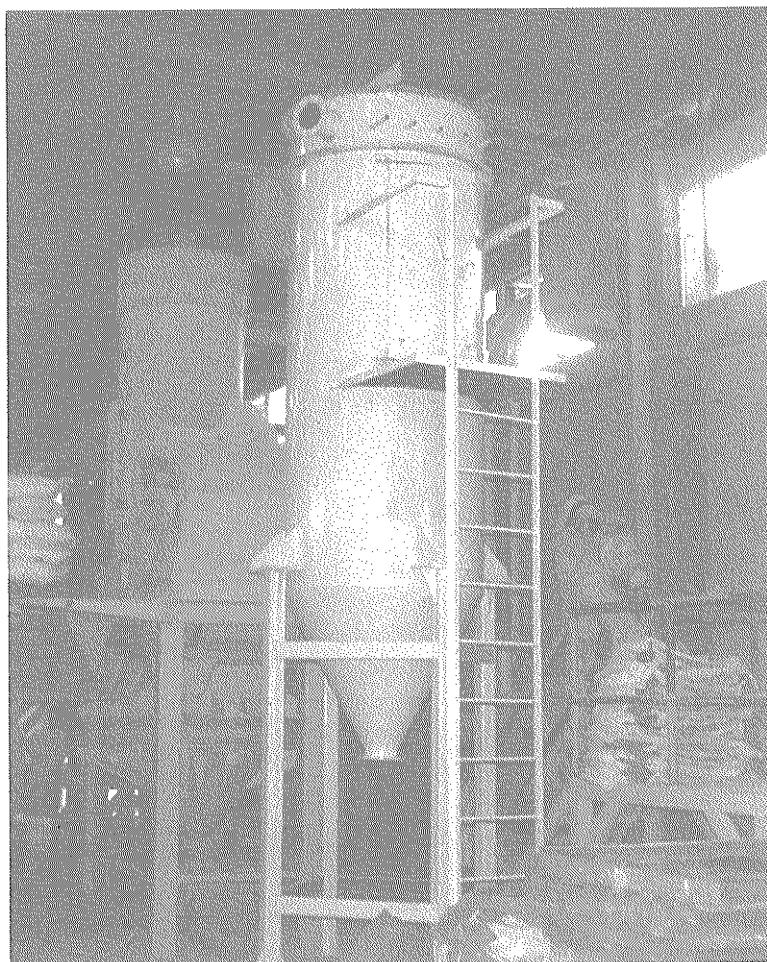
APENDICE N

MANGAS DE POLIPROPILENO LISTAS PARA SU MONTAJE



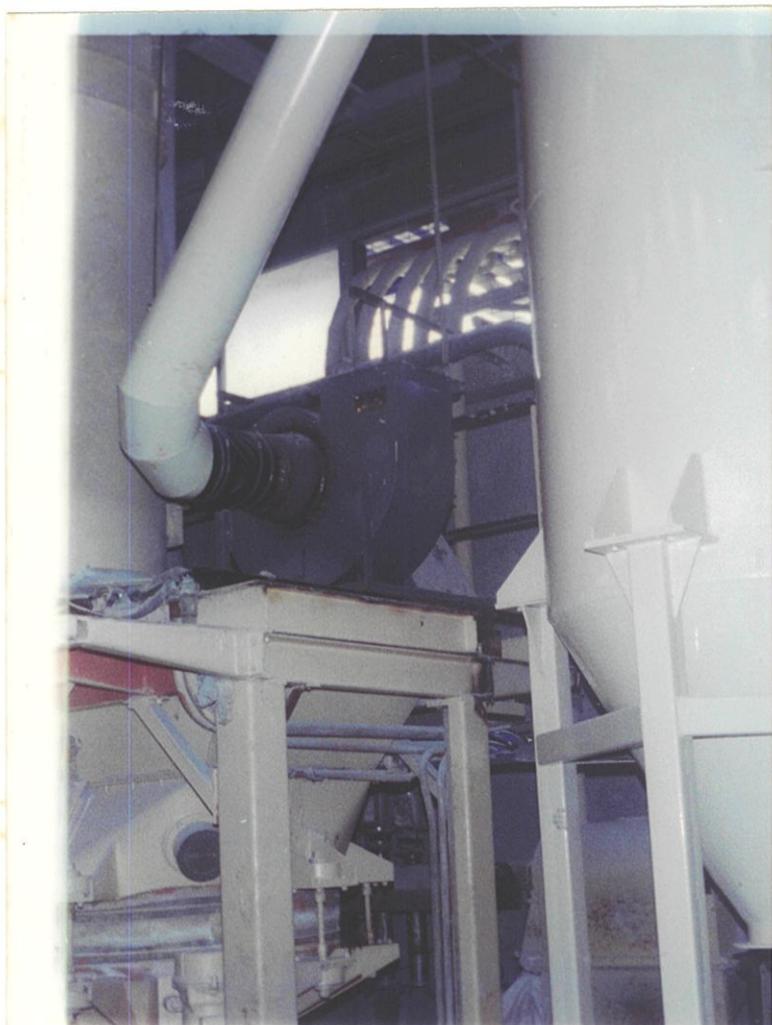
APENDICE O

MONTAJE DEL COLECTOR DE POLVO



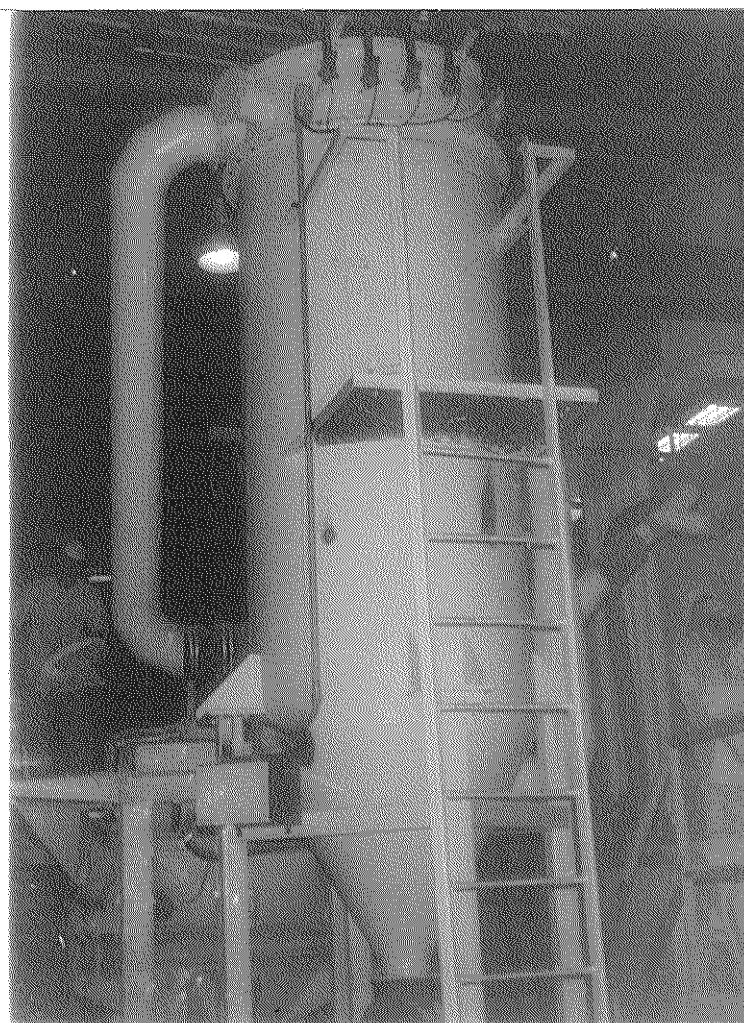
APENDICE P

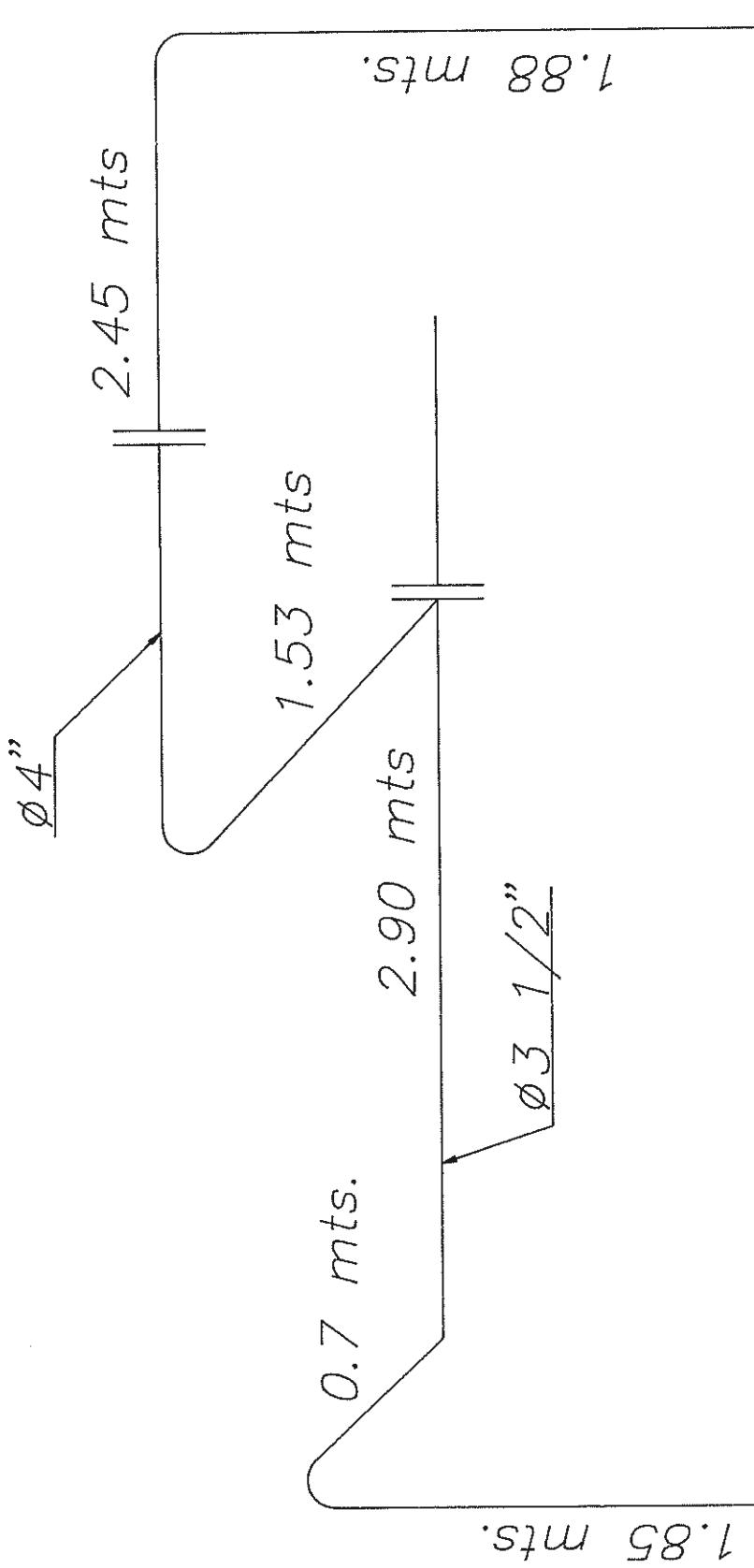
MONTAJE DEL VENTILADOR Y TUBERIA DE ASPIRACION



APENDICE Q

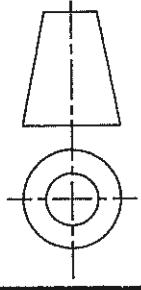
COLECTOR DE POLVO EN FUNCIONAMIENTO

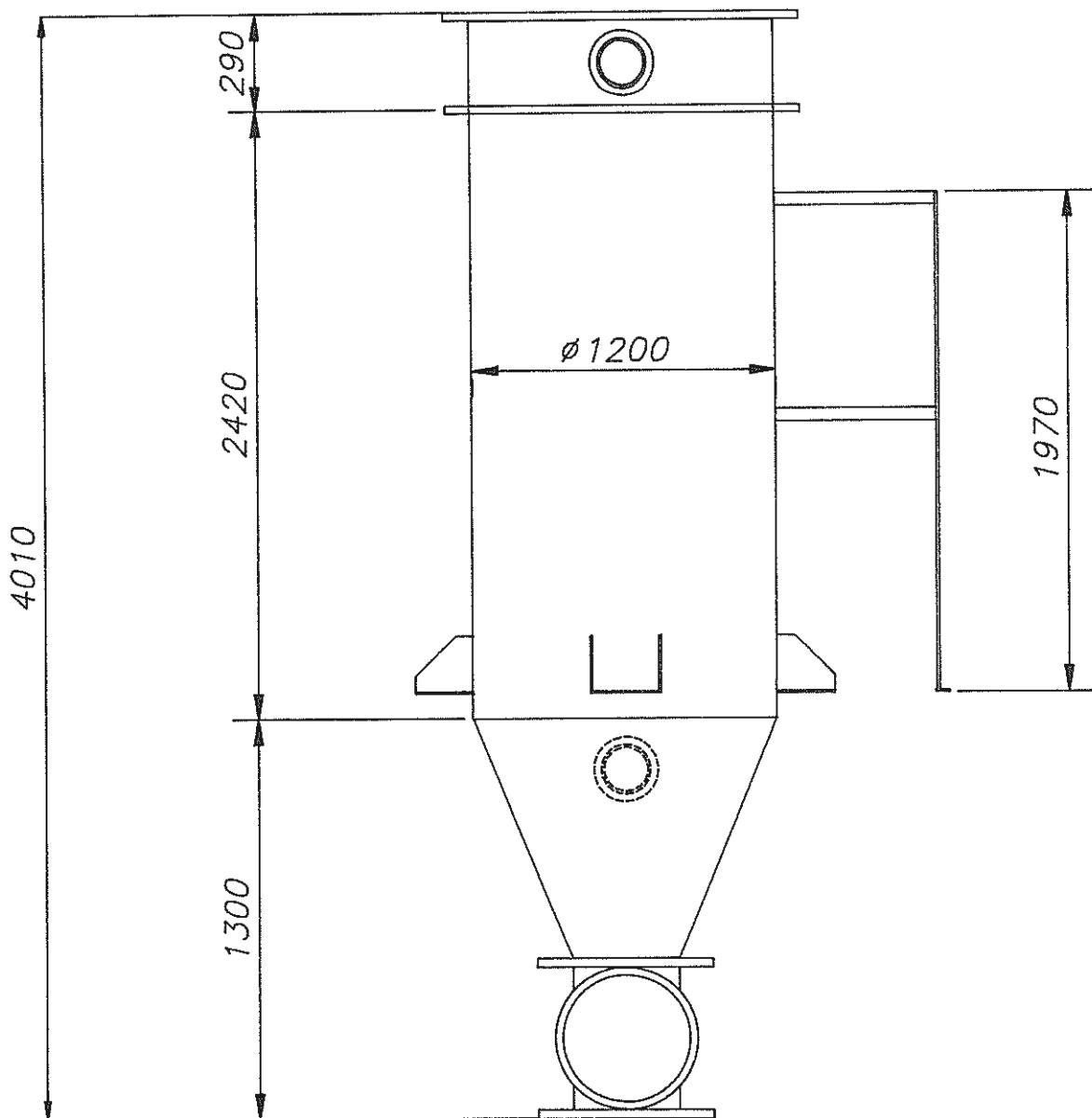




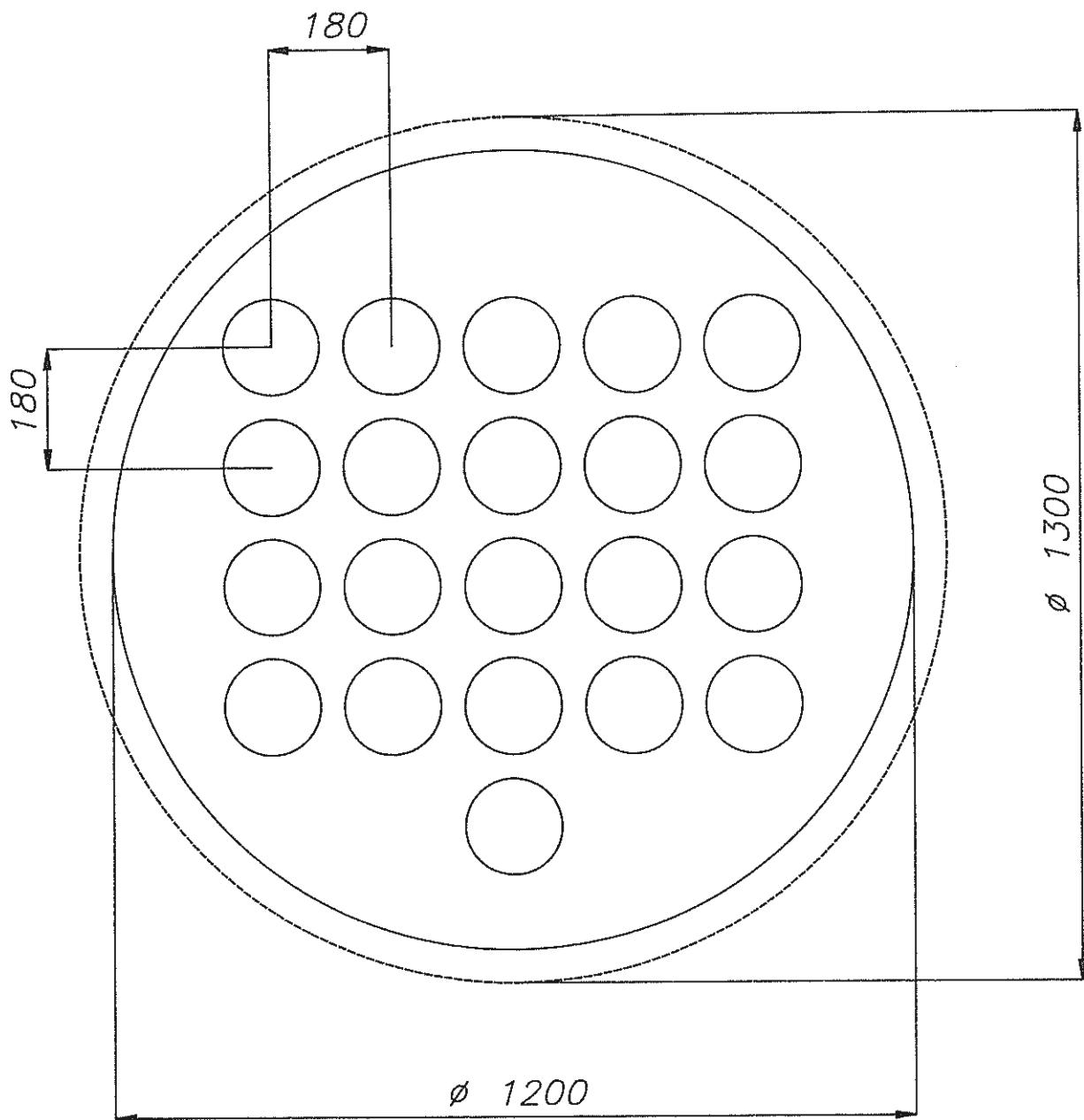
Nombre	Fecha	Facultad de
Dibujo N. Apolo	25/05/96	ESPOL
Revisado M. Helguero	13/06/96	Ingeniería Mecánica
Aprobado M. Helguero	3/07/96	
S/E		

Modificación de tuberías
en rompesacos





Dibujo	Nombre	Fecha	<i>Facultad de Ingeniería Mecánica</i> <i>ESPOL</i>
Revisado	N. Apolo	25/05/96	
Aprobado	M. Helguero	13/06/96	
S/E	<i>Colector de Polvos</i>		



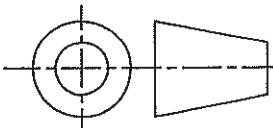
	Nombre	Fecha
Dibujo	N. Apolo	25/05/96
Revisado	M. Helguero	13/06/96
Aprobado	M. Helguero	3/07/96

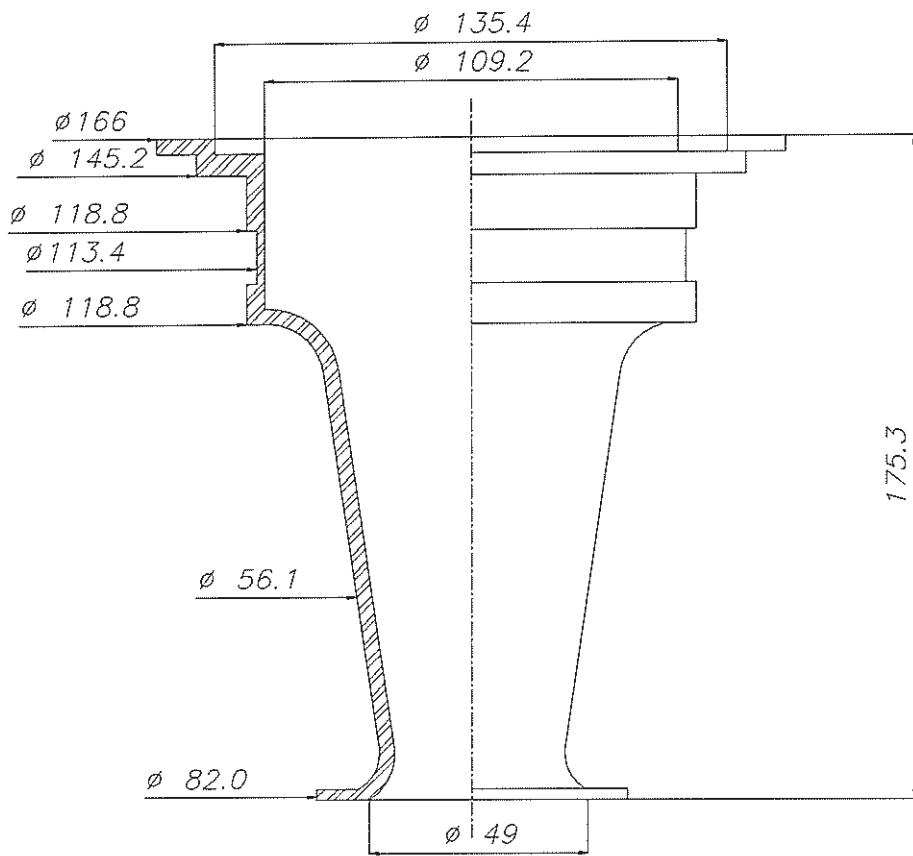
Facultad de
Ingeniería Mecánica

ESPOL

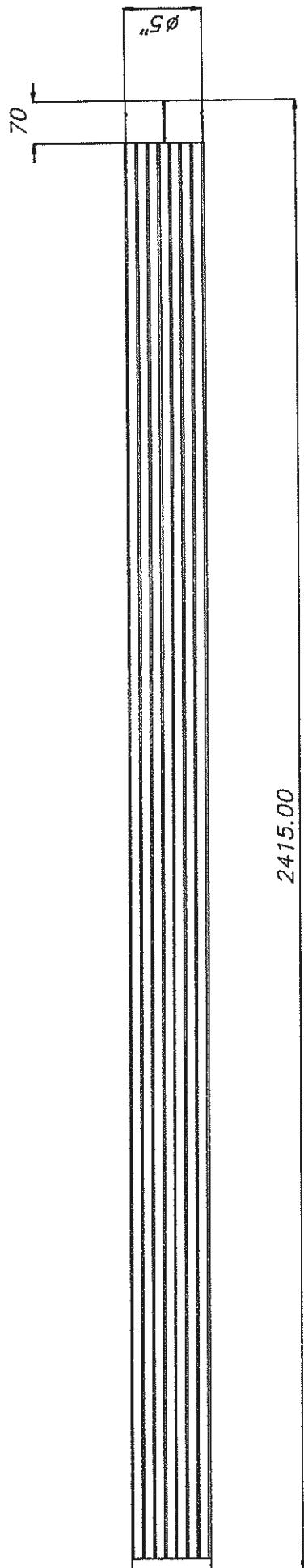
S/E

Espejo del
Colector de Mangas



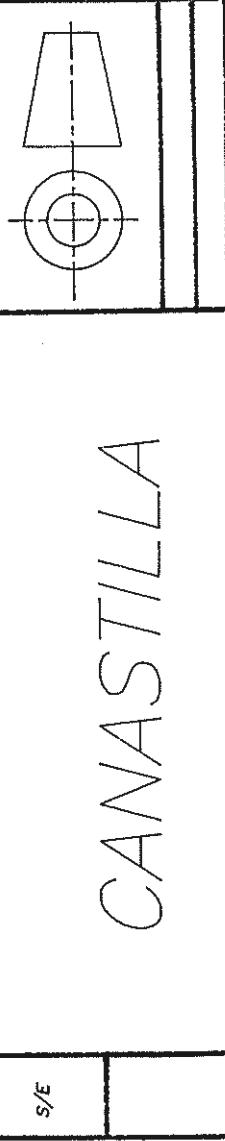


Dibujo	Nombre	Fecha	<i>Facultad de Ingenieria Mecánica</i>	ESPOL
Dibujo	N. Apolo	25/05/96		
Revisado	M. Helguero	13/06/96		
Aprobado	M. Helguero	3/07/96		
S/E	Tobera			

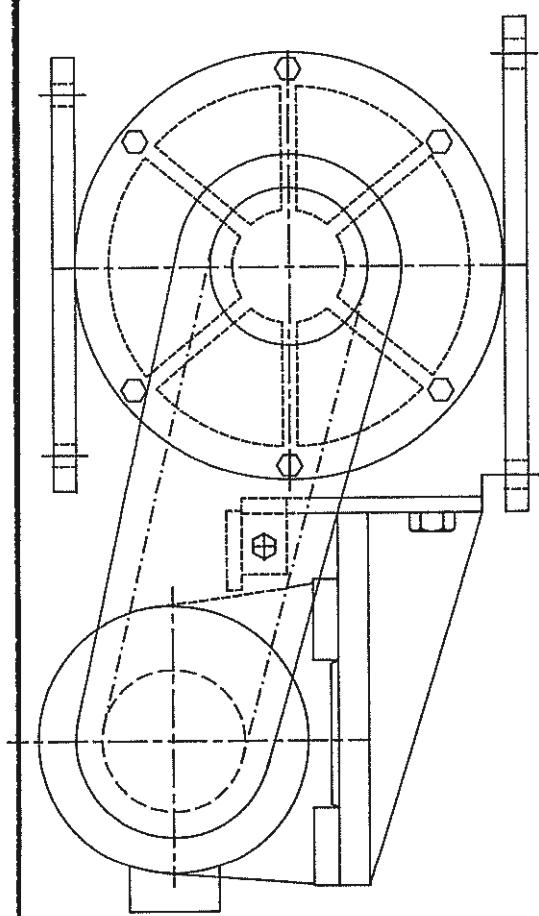
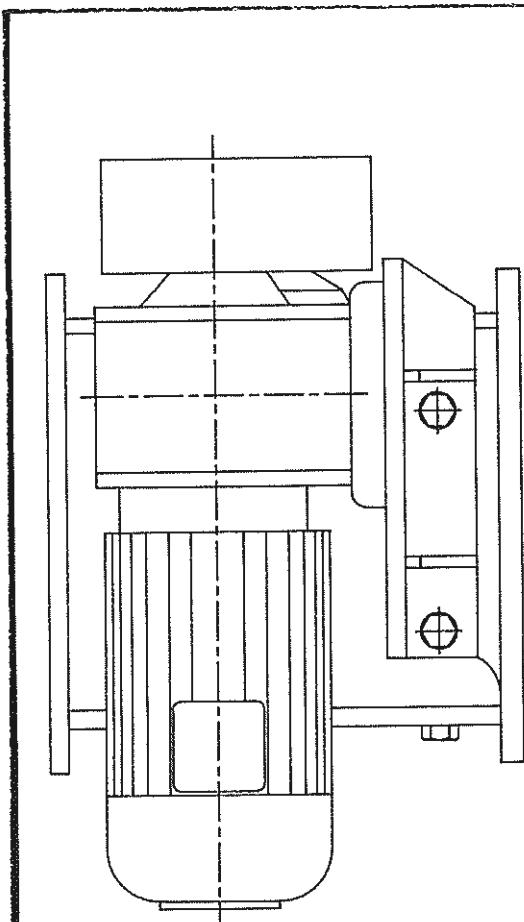


2415.00

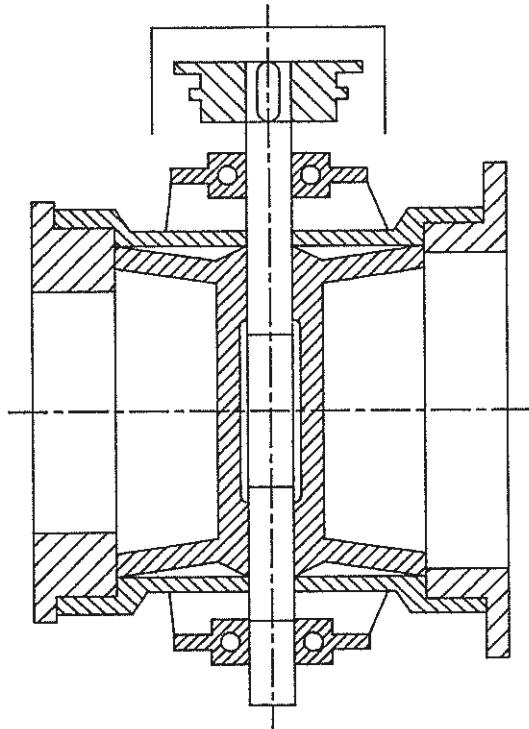
Facultad de Ingeniería Mecánica		
Nombre	Fecha	ESPOL
Dibujo N. Apdo	25/05/96	
Revisado M. Helguero	13/06/96	
Aprobado M. Helguero	3/07/96	
S/E		



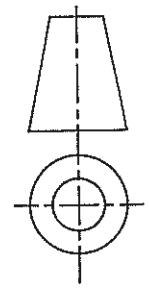
CANASTILLA



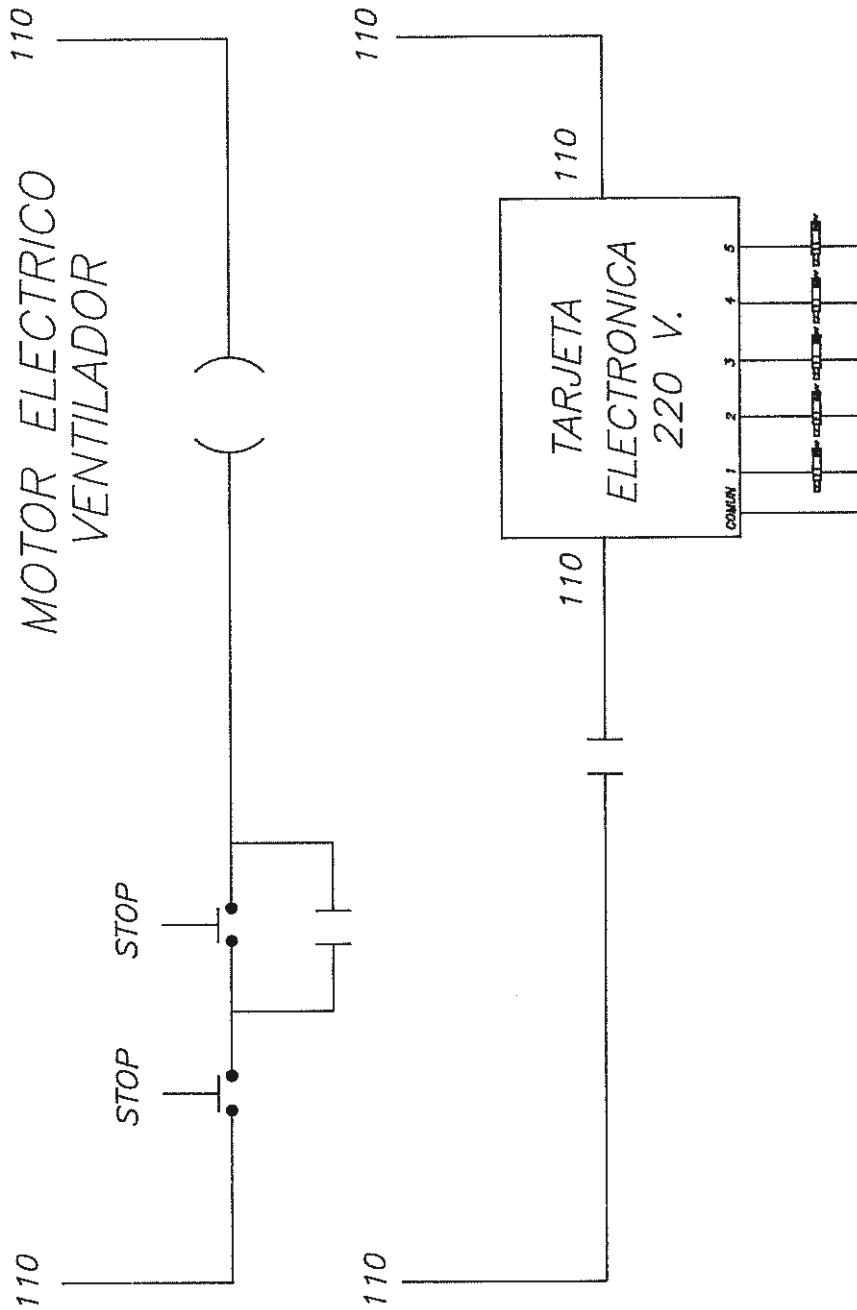
<i>Facultad de</i>	<i>ESPOL</i>
<i>Ingeniería Mecánica</i>	
<i>Dibujo N. Apolo</i>	<i>25/05/96</i>
<i>Revisado M. Helguero</i>	<i>13/06/96</i>
<i>Aprobado M. Helguero</i>	<i>3/07/96</i>
<i>S/E</i>	



*Válvula
Rotativa*

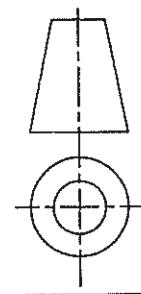


MOTOR ELECTRICO VENTILADOR



	Nombre	Fecha
Dibujo	N. Apolo	25/05/96
Revisado	M. Helguero	13/06/96
Aprobado	M. Helguero	3/07/96

Facultad de
Ingeniería Mecánica



Esquema del Control del Sistema de Limpieza del Colector de Polvo

BIBLIOGRAFIA

1. Carrera de la Torre Luís Ing., Presidente de la CAAM, Políticas Básicas Ambientales del Ecuador, Quito, Decreto 1802 de 1 de Junio de 1994, Registro Oficial 456 de 7 de Junio de 1994
2. Crawford, M. Air Pollution Control Theory. New York, ESPOL, 1984
3. Croom Miles L., Filter Collector Technology, 4^{ta} edición, Mc Grawhill, 1994
4. León Pacheco Dixon, Diseño Computarizado de un Sistema de Transporte Neumático, (Tesis Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica, 1992)
5. Perry J., Manual del Ingeniero Químico, Dinámica de Fluidos, pp 5.50 - 5.52
6. Bethea Robert M., P.E., Air Pollution Control Technology an Engineering Analisys Point of View, (1978) pp 145 - 201
7. BHA International, Seminario en Mantenimiento de Equipos de Control de Contaminación Ambiental, Colombia, Enero 30, 1996
8. Acosta Renán, Diseño y Construcción de un Sistema de Transporte Neumático a Presión Positiva utilizando una Esclusa Dosificadora, (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1992)
9. Pareto L., Formulario de Mecánica, 4^{ta} edición, CEAC, 1994
10. Marks, Manual del Ingeniero Mecánico (Mc Graw Hill, 2^{da} edición en español, Volumen III) pp 14.50 - 14.58
11. ESPOL, Manual de Ventilación Industrial, 19 th edition
12. Shigley Joseph. E., Diseño en Ingeniería Mecánica (Mc Graw Hill, 3^{ra} edición, 1985)