



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA
DE COLECCION DE UN LAVADOR DE GASES TIPO
VENTURI A NIVEL PILOTO

TESIS MANCOMUNADA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A N :

GOMEZ SOLARES ANA MARIA

MAYA TELLO MARTHA PATRICIA

MEXICO, D. F.

1991

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE GENERAL

	Página
INTRODUCCION.	1
CAPITULO 1 GENERALIDADES SOBRE EMISION Y RECOLECCION DE PARTICULAS.	7
1.1 Contaminantes.	8
1.2 Normas Técnicas Ecológicas.	10
1.3 Método para la determinación de la emisión de partículas sólidas.	13
1.4 Determinación del tamaño de partícula.	15
1.5 Diámetro de corte.	16
1.6 Mecanismos de colección de partículas.	17
1.7 Superficies de colección.	20
CAPITULO 2 GENERALIDADES SOBRE EQUIPOS DE COLECCION.	21
2.1 Consideraciones para el diseño.	22
2.2 Clasificación de equipos de colección.	26
2.3 Descripción de colectores inerciales secos.	26
2.4 Descripción de colectores húmedos.	33
2.5 Filtros de tela.	34
2.6 Precipitadores electrostáticos.	37
2.7 Otros equipos.	39
2.8 Consideraciones generales para la selección.	40
2.9 Fuerza de colección.	42
2.10 Aplicaciones del equipo.	43

CAPITULO 3 DESCRIPCION DE LAVADORES DE GASES.	45
3.1 El sistema del lavador.	46
3.2 Tipos de lavadores.	47
3.3 Ventajas y desventajas de los lavadores más comunes.	65
3.4 Aplicaciones de lavadores.	68
CAPITULO 4 LAVADOR VENTURI.	72
4.1 Funcionamiento.	73
4.2 Aspectos de diseño.	74
4.3 Aplicaciones.	82
CAPITULO 5 EXPERIMENTACION	85
5.1 Muestreo	87
5.2 Determinación de la capacidad de la fuente de succión.	87
5.3 Dimensionamiento del lavador.	89
5.4 Construcción.	94
5.5 Parte experimental.	95
CAPITULO 6 ANALISIS DE RESULTADOS.	104
6.1 Influencia de la relación líquido/gas.	105
6.2 Influencia de la concentración de material particulado.	106
CAPITULO 7 CONCLUSIONES.	115
BIBLIOGRAFIA.	118

INTRODUCTION

INTRODUCCION

La preocupación por la problemática de la contaminación del medio ambiente ha alcanzado en los últimos tiempos una dimensión inusitada. Diariamente el hombre de la calle oye la llamada de auxilio ante un planeta en peligro y difícilmente acierta a distinguir entre la realidad y la ficción, pues estos dos elementos y algunos más aparecen casi siempre mezclados, con evidente afán de servir causas muy diversas y contradictorias.

El aire constituye uno de los elementos básicos de todo ser vivo. Diariamente nuestros pulmones filtran unos 15 Kg de aire atmosférico, mientras que sólo absorbemos 2.5 Kg de agua y menos de 1.5 Kg de alimentos.

Por ello, ya desde los tiempos más remotos, el hombre ha sido consciente del peligro que representaba una atmósfera contaminada, como la creada de modo natural con ocasión de una erupción volcánica, y como la provocada por él mismo.

Hay contaminación del aire cuando la presencia de una sustancia extraña o la variación importante en la proporción de sus constituyentes, es susceptible de provocar efectos perjudiciales o de crear molestias a los seres vivos. Esas sustancias extrañas que provocan la contaminación atmosférica son los agentes contaminantes, gases y sólidos, que se concentran en suspensión en la atmósfera y cuyas potenciales fuentes de origen son las siguientes:

a) Procesos industriales, que a pesar de ciertas medidas preventivas constituyen uno de los principales focos contaminantes.

b) Combustiones domésticas e industriales, principalmente los combustibles sólidos que producen humos, polvo y óxidos de azufre.

c) Vehículos de motor, cuya densidad en las regiones muy urbanizadas determina una elevada contaminación atmosférica (óxidos de carbono, plomo, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas).

Uno de los agentes contaminantes más comunes es el polvo y todo tipo de partículas sólidas que se depositan en las grandes aglomeraciones urbanas. La importancia cuantitativa de este tipo de contaminación es muy grande [18].

La mayoría de las industrias controlan solamente las partículas cuyo tamaño es mayor de 2 micras. Sin embargo, las partículas finas son las más dañinas para la salud humana. Estas partículas causan también la reducción de la visibilidad del aire. Se asegura que las partículas finas muestran el grado más alto de penetración y retención en el sistema respiratorio humano. Las partículas mayores de 3 micras son removidas eficientemente por el aire inhalado, pero las partículas de menor diámetro se escapan a este mecanismo y se depositan y retienen en el bronquio terminal y los alvéolos.

Existen muchos efectos fisiológicos causados por las partículas finas. Primero, muchas partículas, como las de asbesto, trazas metálicas y sílice, son perjudiciales porque generan reacciones químicas con sustancias del cuerpo. Segundo, aún partículas relativamente inertes como el carbón, talco, etc., bloquean la vía pulmonar, ocasionando un decremento en el intercambio de gases y posiblemente interfieren con la reproducción celular y funciones enzimáticas. Y tercero, aumentan los efectos sinérgicos: partículas porosas pueden absorber gases contaminantes y liberarlos dentro de los pulmones (ej. dióxido de azufre, el

cual se condensa en partículas y se convierte en sustancias más peligrosas como trióxido de azufre o ácido sulfúrico; y benzopireno, un cancerígeno que se ha encontrado en el humo del tabaco, el cual ataca otras partículas y se depositan en los pulmones).

Las partículas finas también son responsables de la bruma que hace indistintos los objetos distantes. Las partículas más efectivas en la dispersión de la luz y reducción de la visibilidad son de décimas de micra, que son las partículas típicas suspendidas en la atmósfera [10].

Finalmente, las partículas finas son una de las principales causas de la modificación del clima en la tierra, al generar el llamado "efecto de invernadero" por el cual la temperatura del planeta aumenta gradualmente con el tiempo, lo que causa cambios radicales en los ecosistemas del planeta.

Por estas razones, es primordial el estudio de técnicas y equipos de recolección de partículas finas más eficientes y menos costosos, que puedan ser adaptados fácilmente a los requerimientos de las distintas industrias existentes en nuestro país, y especialmente, en la Ciudad de México, en la cual el índice de emisión de partículas contaminantes es muy elevado.

El problema de la contaminación ambiental es muy grave por lo que se han tenido que establecer niveles máximos permisibles de emisión de los principales contaminantes.

Para el control de las partículas se han desarrollado diferentes equipos de control de los cuales los lavadores de gases, los filtros de bolsas y los precipitadores electrostáticos son los más adecuados para remover partículas finas. Sin embargo, los lavadores de gases son los más económicos en cuanto a su inversión inicial.

Para la realización de este trabajo se decidió utilizar un lavador de tipo Venturi debido a que tiene la mayor eficiencia de colección de todos los lavadores de gases, ya que su diámetro de corte se encuentra en el intervalo de micras y submicras, que son las partículas más difíciles de remover.

El objetivo de esta tesis es observar el fenómeno de lavado en un lavador tipo Venturi y determinar la influencia del cambio en los requerimientos de energía en la eficiencia de colección.

Por ello, en este trabajo se presentan, en el capítulo 1, las generalidades sobre emisión y recolección de partículas. En este capítulo se definen y clasifican las sustancias contaminantes, se presentan las Normas Técnicas Ecológicas que determinan los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes, el método de muestreo para la medición de la emisión de partículas en ductos, el método para determinar el tamaño de partícula y los mecanismos de colección de partículas.

En el capítulo 2 se presentan generalidades sobre los distintos equipos de colección de partículas y las consideraciones que deben tomarse en cuenta en el diseño y selección de un sistema de control de la contaminación, así como las aplicaciones de los colectores más comúnmente utilizados.

Debido a que los colectores húmedos o lavadores de gases son de los equipos más eficientes, en el capítulo 3 se muestra el sistema de un lavador, los tipos de lavadores que existen, las ventajas y desventajas de los más utilizados y sus aplicaciones.

A sí mismo, en el capítulo 4 se describe el funcionamiento de un lavador Venturi, sus aspectos de diseño y aplicaciones

Para la realización de la parte experimental, en el capítulo 5 se dimensionó un lavador tipo Venturi, basándose en la capacidad de la fuente de succión de un tren de muestreo. La experimentación realizada con este lavador, el análisis de resultados y las conclusiones se presentan en los capítulos 5, 6 y 7 respectivamente.

CAPITULO 1

GENERALIDADES SOBRE EMISION Y RECOLECCION DE PARTICULAS

GENERALIDADES SOBRE EMISION Y RECOLECCION DE PARTICULAS

1.1 CONTAMINANTES.

Un contaminante es toda materia, sus combinaciones, compuestos o derivados quimicos y biológicos tales como humos, polvos, gases, cenizas, residuos v cualesquiera otros que al incorporarse o adicionarse al aire, agua o tierra, puedan alterar o modificar sus características naturales o las del ambiente.

Los contaminantes se clasifican ya sea por su origen, su composición química o por su estado. Para la realización de este trabajo tomaremos la clasificación de acuerdo con el estado del contaminante, esto es:

Gases.

Los gases presentes en la atmosfera como contaminantes, se comportan como el aire. Una vez difundidos no tienden a depositarse.

Materia Particulada.

Esta se clasifica en: polvos, vapores, humos y neblinas.

Los polvos son todas aquellas partículas sólidas que son capaces de formar temporalmente una suspensión gaseosa, no se difunden pero se asientan por la influencia de la gravedad. Los polvos son resultado de operaciones como molienda, aplastamiento, perforación, pulverización, tamizado y explosiones.

Los vapores son partículas sólidas generadas por la condensación del estado gaseoso, producido generalmente después de la volatilización de sustancias fundidas y, a

menudo, acompañada de una reacción química.

Los humos son partículas sostenidas por un gas (de un tamaño menor de 0.5 micras) resultado de una combustión incompleta de materiales como madera, carbón y petróleo.

Las neblinas y plumas son dispersiones de partículas líquidas (de 0.1 a 2.5 micras) de baja concentración, aunque las partículas son de gran tamaño [11].

TABLA 1
Materia Particulada

POLVOS	VAPORES	HUMOS	NEBLINAS
Alúmina	Halogenuros	Ceniza	Acidas
Fluoruro de	metálicos	Partículas	Crómica
calcio	Oxidos meta-	quemadas	Fosfórica
Cemento	licos	Compuestos	Sulfúrica
Carbón	Tetrafluoruro	orgánicos	Aceites
Minerales	de silicio	Hollín	Rocío salino

Fuente de contaminación

Procesos de combustión
Operaciones con alimentos
Máquinas estacionarias
Operaciones petroleras
Procesos químicos
Procesos electrometalúrgicos
Procesos minerales
[11]

Aerosoles

Polvo, neblina
Polvo, neblina
Humo
Polvo, neblina
Polvo, neblina, humo
Polvo, humo
Polvo, humo

Las partículas, por lo tanto, son las causantes del humo visible y de la suciedad arrastrada y depositada por el viento. Por esta razón el control de contaminación en las industrias está enfocado a la remoción de estos contaminantes.

1.2 NORMAS TÉCNICAS ECOLÓGICAS.

En México, la Ley General de Equilibrio Ecológico y de la Protección al Ambiente, prevé que las emisiones a la atmósfera deberán sujetarse a las Normas Técnicas Ecológicas en las que se determinen los niveles máximos permisibles de emisión, por contaminante o por fuente de contaminación a fin de asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y para conservar el equilibrio ecológico.

Las Normas Técnicas Ecológicas [23] son:

NTE-CCAT-005/88, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes de procesos de combustión de diesel en fuentes fijas.

Estos niveles son:

CONTAMINANTES	NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	ZONAS CRÍTICAS (Kg/m ³)	RESTO DEL PAÍS (Kg/m ³)
PARTICULAS	0.260	0.300
MONOXIDO DE CARBONO	0.600	0.665
BIOXIDO DE AZUFRE	17.000	34.000
OXIDOS DE NITROGENO	2.700	3.000

NTE-CCAT-007/88, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes de procesos de combustión de combustóleo en fuentes fijas.

Estos niveles son:

CONTAMINANTES	NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES	
	ZONAS CRITICAS (Kg/m ³)	RESTO DEL PAIS (Kg/m ³)
PARTICULAS	4.240	6.740
MONOXIDO DE CARBONO	0.600	0.660
BIOXIDO DE AZUFRE	57.000	95.000
OXIDOS DE NITROGENO	6.600	6.600
	8.000	8.000

El nivel máximo permisible para los óxidos de nitrógeno depende de la capacidad del equipo de combustión: el primer nivel es para equipos con capacidad hasta de $106 \cdot 10^6$ joules/hora. El segundo nivel es para capacidades mayores.

NTE-CCAT-008/88, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes de procesos de combustión de gas natural en fuentes fijas.

Estos niveles son:

CONTAMINANTES	NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES (Kg/10 ⁶ m ³)
PARTICULAS	100
MONOXIDO DE CARBONO	500
	640
BIOXIDO DE AZUFRE	10
OXIDOS DE NITROGENO	2250
	9000

Las unidades son kilogramo de contaminante por cada millón de metros cúbicos de gas natural consumido a un kilogramo por centímetro cuadrado (98060 Pa) y 293 K (20 °C).

El nivel máximo permisible para monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno depende de la capacidad del equipo de combustión. El primer nivel es para capacidades hasta de $106 \cdot 10^6$ joules/hora; el segundo es para capacidades mayores.

NTE-CCAT-009/88, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

Estos niveles dependen del flujo de gases en la fuente contaminante de acuerdo a la siguiente lista:

FLUJO DE GASES EN LA FUENTE m^3/min	NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES	
	ZONAS CRITICAS mg/m^3	RESTO DEL PAIS mg/m^3
5	1,536	2,304
10	1,148	1,722
30	724	1,086
50	584	876
80	479	719
100	437	655
500	222	333
800	182	273
1000	166	249
3000	105	157
5000	84	127
8000	69	104
10000	63	95
30000	40	60
50000	32	48

La interpolación y extrapolación de los datos no contenidos en esta tabla están dados por las ecuaciones:

ZONAS CRITICAS

$$E = 3020 C^{-0.42}$$

RESTO DEL PAIS

$$E = 4529.7 C^{-0.42}$$

donde:

E = nivel máximo permisible de emisión en miligramos por metro cúbico normal.

C = flujo de gases en la fuente en metros cúbicos normales por minuto.

La emisión está referida a condiciones normales de temperatura 298 K (25 °C) y presión de 101,325 Pa (760 mmHg) base seca.

En todas estas normas se establece que los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de los contaminantes antes mencionados, podrán rebasarse en caso de operaciones de arranque y limpieza del equipo de colección siempre y cuando no excedan periodos mayores de 15 minutos y que estos no se presenten mas de 3 veces al día. Se establece también que para los efectos de cuantificación de las emisiones, deberán utilizarse los procedimientos establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, o en su caso, en las que expida la autoridad competente.

1.3 METODO PARA LA DETERMINACION DE LA EMISION DE PARTICULAS SOLIDAS.

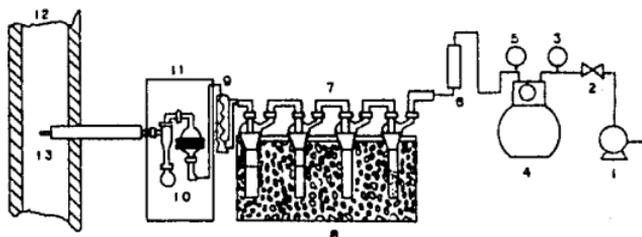
Para resolver un problema de emisión de partículas en cualquier industria, es necesario efectuar un estudio de la fuente contaminante para conocer el estado de ésta respecto a las normas anteriores. Este estudio debe llevarse a cabo siguiendo los métodos de muestreo aceptados por las autoridades. En el caso de emisión de partículas, el método aceptado es el descrito en la norma oficial mexicana NOM-AA-10-1974 [23].

La NOM-AA-10-1974 establece que para determinar por captación la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases que fluyen por un conducto, se debe seguir el método siguiente:

a) Colección de la muestra.

1. Colección de la muestra.
2. Medición del flujo.
3. Determinación del tiempo total de muestreo.

b) Montaje del tren de muestreo (fig. 1).



1. FUENTE DE SUCCION
2. VALVULA
3. MANOMETRO
4. GASOMETRO
5. TERMOMETRO

6. ROTAMETRO
7. FRASCOS LAVADORES
8. MEDIO REFRIGERANTE
9. CONDENSADOR
10. MEDIO FILTRANTE

11. CAMARA CALEFACTORA
12. CONDUCTO
13. SONDA

Figura 1

c) Ejecución de la prueba.

d) Recolección de la muestra.

e) Cálculo de la emisión total de partículas por el conducto.

Para la planeación de la prueba es necesario recabar la información completa sobre el proceso y consumo de

combustible durante el periodo de muestreo. Hay que determinar si el proceso es estable dentro de las condiciones normales o si es cíclico con una iniciación y terminación predecibles. Si el proceso es estable, se deben mantener sus condiciones de operación en un nivel determinado durante un tiempo suficiente para permitir varios muestreos de duración satisfactoria. Si el proceso es cíclico, se debe decidir si se muestrea durante un ciclo completo o si éste es suficientemente largo para poder dividirse en etapas definidas.

1.4 DETERMINACION DEL TAMAÑO DE PARTICULA.

El tamaño es una medida consistente de la extensión espacial de la partícula, como el diámetro, área o volumen. También es una medida del comportamiento de la partícula como una función de su extensión espacial. Si las partículas son esféricas o cúbicas, el tamaño corresponde a una dimensión geométrica medible. Otras formas geométricas regulares pueden definirse en términos de radios dimensionados. Si las partículas son de forma irregular, el radio se define por mediciones arbitrarias consistentes.

El método utilizado en la determinación del tamaño de una partícula es el del impactor de cascada (fig. 2).

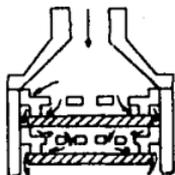


Figura 2

La muestra de aire con polvo pasa a través de una serie de

orificios, el gas se acelera en cada orificio; una copa colectoras que se encuentra en cada orificio sirve como blanco de impacto. Las partículas son retenidas en estas copas dependiendo de su tamaño.

Las partículas se clasifican por medio de impactos inerciales de acuerdo a su masa. las más largas (más pesadas) son colectadas en el plato opuesto a la primera etapa, y las más pequeñas en el plato opuesto a la última etapa.

La clasificación de partículas con impactores tiene ciertas ventajas para la determinación microscópica de la distribución de tamaños cuando existe una gran variación en el tamaño de partícula. Este método provee un camino para obtener distribuciones de masas en el rango de 0.3 a 60 micras.

1.5 DIAMETRO DE CORTE.

Un parámetro muy conveniente para describir la capacidad de un colector de polvo es el diámetro de la partícula que puede ser colectada con un 50 % de eficiencia. A este diámetro se le denomina como diámetro de corte. Por lo tanto, un equipo con un diámetro de corte de 1.0 micra podrá coleccionar el 50 % de las partículas de 1 micra de diámetro.

La razón por la que el diámetro de corte es tan útil como parámetro es porque la curva de eficiencia de colección contra diámetro de partícula, para la colección por impacto inercial, es muy inclinada. En la figura 3 se muestra esta gráfica para un colector. El funcionamiento del colector muestra que la partícula cuyo diámetro es igual a la mitad del diámetro de corte, puede ser colectada con aproximadamente el 10 % de la eficiencia, mientras que las partículas con un diámetro del doble del diámetro de corte pueden ser

colectadas con el 90 % de eficiencia [3].

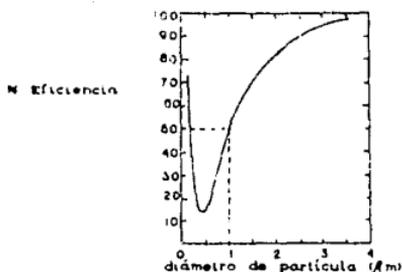


Figura 3

Debido a que el corte es claramente definido, puede usarse como una aproximación burda el concepto de que el equipo de control colecta todo lo que sea mayor que el diámetro de corte y deja pasar todo lo que sea menor.

1.3 MECANISMOS DE COLECCION DE PARTICULAS.

Existen varias clases de dispositivos para la colección de polvo, disponibles en el mercado. Todos utilizan los mismos principios para remover el material particulado de la corriente de gas. La diferencia entre ellos resulta ser principalmente la naturaleza de la fuerza que se aplica a la partícula para poder colectarla. Estas fuerzas, ya sean solas o combinadas, constituyen los mecanismos básicos para obtener la recolección (fig. 4).



Figura 4

Para lograr que las partículas de aerosol suspendidas en el gas sean removidas, el gas debe pasar por una zona en la cual las partículas caigan bajo la influencia de algún tipo de fuerza (o fuerzas) que causen un cambio en su dirección respecto a la corriente de gas. Las partículas deben permanecer bajo la acción de esta fuerza el tiempo suficiente para que sean dirigidas a alguna superficie de colección de donde serán removidas. En algunos casos la partícula choca con la superficie de colección sin necesidad de alguna fuerza, a esto se le llama intercepción directa.

Se asume que una vez que la partícula colisiona con la superficie de colección, se adhiere a ella y ya no puede regresar a la corriente de gas. El diseño de cualquier colector debe hacerse de tal manera que se cumpla esta suposición.

Un acercamiento básico al problema de colección de partículas pequeñas es la evaluación de las fuerzas que afectan el movimiento de la partícula y causan que ésta se mueva desde una corriente de aerosol a una superficie de colección. Analizando estas fuerzas se ha encontrado que existen parámetros dimensionales que caracterizan los diferentes mecanismos y los definen.

Siempre que un parámetro que caracteriza a un mecanismo de colección es más grande que los otros parámetros, la colección puede atribuirse totalmente al mecanismo que este parámetro caracteriza.

Aunque las fuerzas que afectan los mecanismos de colección son aditivas, las eficiencias individuales no son aditivas directamente, sin embargo, cada mecanismo contribuye para lograr una eficiencia total comparada con la que se obtiene en un sistema en donde los mecanismos son favorables.

La eficiencia de colección para un mecanismo dado será proporcional al tamaño de la partícula, al tamaño del colector y a la velocidad de la corriente.

Para partículas de densidad normal y cuyo tamaño se encuentra en el intervalo de micras y submicras, los mecanismos elementales por medio de los cuales se lleva a cabo la colección en una superficie dentro de una corriente de aerosol son:

INERCIA.

Una partícula se lleva a lo largo de una corriente de aire acercándola a un obstáculo, la partícula tiende a seguir la corriente pero golpea el obstáculo debido a su inercia.

INTERCEPCION.

La trayectoria del centro de una partícula relativamente larga, mientras no intersecta la superficie de colección, debe pasar lo suficientemente cerca para que la superficie de la partícula toque al colector.

ATRACCION ELECTROSTATICA.

La partícula puede tener contacto con la superficie de colección por medio de una fuerza electrostática existente o inducida entre la partícula y el colector.

SEDIMENTACION.

Las partículas en una corriente de aire lenta pueden depositarse en la superficie de colección bajo la influencia de la fuerza de gravedad.

CENTRIFUGACION.

Las partículas son separadas de la corriente de gas debido a la fuerza centrífuga generada por el giro de la corriente en el interior del colector.

DIFUSION.

El movimiento browniano de las partículas es un movimiento impartido a partículas muy pequeñas por el bombardeo al azar de moléculas de aire sobre la partícula. El movimiento browniano aumenta conforme disminuye el tamaño de las partículas y ejerce una gran influencia en partículas menores a 0.1 micras.

Por todo esto, un análisis fundamental del proceso de impacto debe incluir también un análisis de los distintos mecanismos de colección.

1.7 SUPERFICIES DE COLECCION.

Existen dos categorías generales de superficies de colección: una es la superficie límite contenida en una zona por donde se hace fluir el gas. Este tipo de superficie puede ser una pared plana o el interior de un cilindro. El otro tipo de superficie es el exterior de un blanco, como un cilindro (por ejemplo, una fibra) o una esfera (por ejemplo, una gota de líquido), o algo de forma irregular como la presente en un empacado granular. Un colector de tipo blanco consta de un arreglo de muchos elementos utilizados como blanco.

CAPITULO 2

GENERALIDADES SOBRE EQUIPOS DE COLECCION

GENERALIDADES SOBRE EQUIPOS DE COLECCION

2.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO.

La selección del tipo de colector más apropiado para una remoción de material particulado dada, debe estar basada en el conocimiento del funcionamiento del colector, el cual debe anticiparse (o predecirse) bajo distintas condiciones de operación.

Existen ciertas ventajas y desventajas que acompañan la utilización de cualquier tipo de colector en particular. Con respecto al funcionamiento en términos de la efectividad de colección, requerimientos de energía, costo inicial, costo de operación, facilidad de instalación y mantenimiento, cada uno de los colectores encuentra su tipo de aplicación más apropiado.

La selección requiere la consideración cuidadosa tanto de las características de los contaminantes como de las del dispositivo de control. En muchos casos, la obtención de un funcionamiento pobre en un sistema dado, se debe a que el dispositivo seleccionado no es apropiado para las características de los contaminantes.

Tratar una corriente gaseosa, especialmente en control de contaminantes, es costoso, pero los costos pueden minimizarse no comprando el colector más barato, sino estudiando cuidadosamente el sistema completo como se hace en otras áreas de diseño de proceso.

La tabla II muestra una lista de consideraciones que deben tomarse en cuenta en el diseño de un sistema que se requiere para conocer las necesidades que se tienen en cualquier problema de control de la contaminación [10].

TABLA II
LISTA DE CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE
SISTEMAS DE CONTROL DE CONTAMINACION DEL AIRE

- I. Inspección del problema (Existente, Potencial).
- A. Tipo de efecto dañino (Anticipado o Presente)
1. Enfermedades y efectos en la salud en humanos.
 2. Toxicidad en plantas y/o animales.
 3. Daños en materiales:
 - Corrosión, deterioro, ensuciamiento, etc.
 4. Reducción de la visibilidad.
 5. Olor.
 6. Molestias.
 7. Naturaleza de las quejas recibidas.
- B. Propiedades del gas.
1. Contaminantes presentes.
 2. Composición (análisis).
 3. Temperatura.
 4. Presión.
 5. Humedad y punto de rocío.
 6. Equilibrio químico de los componentes.
- C. Relación de flujo.
1. Cantidad de gas que será tratado.
 2. Estabilidad de flujo; posibles fluctuaciones.
- D. Partículas.
1. Líquidas o sólidas.
 2. Distribución de tamaño de partículas.
 3. Cantidad de carga de partículas, masa/vol. de gas.
 4. Propiedades Físicas y Químicas:
 - a. Composición, Forma y Densidad.
 - b. Corrosividad y Abrasividad.
 - c. Propiedades Eléctricas.
 - d. Higroscopicidad y Aglomeración.
 - e. Adsorción y Combustibilidad.

TABLE II (continuación)

E. Localización de la planta:

1. Factores meteorológicos del área.
2. Propiedades adyacentes y de la planta, terreno.
3. Chimeneas:
 - Altura. Localización.
4. Planta existente vs Selección de lugar para planta

F. Grado de control de la contaminación requerido.

1. Estándares locales y Reglamentos.
2. Niveles de Tolerancia.
3. Requerimientos futuros de sistemas de control.
4. Métodos de muestreo y medición.
5. Imagen pública de la planta y compañía.

G. Cambios de condiciones.

1. Operaciones intermitentes conocidas.
2. Descargas accidentales.

II. Resolución del problema.

A. Cambios de Proceso.

B. Materiales variables en proceso.

C. Selección de métodos para control de emisiones.

1. Remoción de gases.
2. Remoción de partículas.
3. Sistemas húmedos o secos.
4. Sistema simple o combinado.
5. Eficiencia.

D. Existencia del sistema de control, posible adaptación

E. Utilización de unidades piloto.

F. Consideración de otra contaminación como consecuencia

III. Diseño del sistema.

- A. Tamaño del Equipo.
- B. Espacio necesario para la unidad de control y equipo auxiliar (ventiladores, ductos, bombas, etc.).
- C. Materiales de construcción. Disminución de corrosión.
- D. Requerimientos de Potencia y Calda de Presión.
- E. Controles necesarios:
 - 1. Temperatura, Humedad, Flujo, Otros.
- F. Necesidades de Mantenimiento.
- G. Flexibilidad del Sistema - Necesidades Futuras.
- H. Aspectos de Seguridad.
- I. Uso de equipo estandard, necesidad de diseño especial
- J. Estimación de Costos.
- K. Optimización de diseño.
- L. Alternativas.
- M. Permisos de Instalación.

IV. Funcionamiento.

- A. Pruebas al Equipo Instalado.
- B. Permisos de Operación.
- C. Monitoreo de la Operación Normal.

2.2 CLASIFICACION DE EQUIPOS DE COLECCION.

Básicamente, el equipo de control se clasifica en las dos categorías siguientes: los que sirven para remover partículas y los apropiados para eliminar contaminantes gaseosos. Las partículas son removidas de las corrientes de aire por medio de fuerzas mecánicas (capítulo 2. Mecanismos de colección.), mientras que los contaminantes gaseosos son removidos químicamente.

Los equipos más utilizados son aquellos que colectan partículas en el intervalo de 0.1 a 100 micras, y trabajan con concentraciones de 0.1 a 100 granos/ft³.

La micra (μ) es la unidad comúnmente usada para medir el tamaño de partícula y se define como 1/1000 mm o 1/25400 in.

Las concentraciones de polvo usualmente se expresan en términos de granos/ft³ de gas (7000 granos = 1 lb).

En general, los equipos de colección se agrupan en cuatro categorías: colectores inerciales secos, colectores húmedos, filtros de bolsas y precipitadores electrostáticos [17].

2.3 DESCRIPCION DE COLECTORES INERCIALES SECOS.

Un colector seco presenta ciertas ventajas y desventajas cuando se compara con un colector húmedo. Si el polvo es un producto útil, el uso de un colector seco evita el costo de reprocesamiento. Sin embargo, el manejo del material colectado puede ocasionar problemas adicionales de polvo. El polvo seco tiene la desventaja de que requiere ventilación, y si es higroscópico, pueden presentarse problemas de apelmazamiento. El gas tratado puede no encontrarse frío o completamente limpio de partículas finas. Sin enfriamiento, los límites de temperatura del equipo deben considerarse. La

corrosión es mínima a menos que el humo tenga neblinas corrosivas. El equipo, por lo general, es voluminoso.

Los colectores inerciales o mecánicos se ajustan mejor para partículas medias o gruesas. Pueden manejarse altas cargas de polvo con caídas de presión y consumo de potencia moderados. Este tipo de colectores tiene una construcción simple lo que da como resultado bajo costo y mantenimiento comparado con otros equipos. La eficiencia no es muy alta; por lo que, para obtener un efluente realmente limpio, deben utilizarse otros tipos de colectores en combinación o en lugar del colector inercial. Los colectores inerciales o mecánicos dependen de la inercia de la partícula en un campo de fuerza de gravedad o centrífugo.

CAMARAS DE SEDIMENTACION POR GRAVEDAD.

En este colector el gas sucio se hace pasar a través de un ducto donde la velocidad se disminuye lo suficiente como para permitir que las partículas grandes sedimenten por gravedad. (Fig. 5)

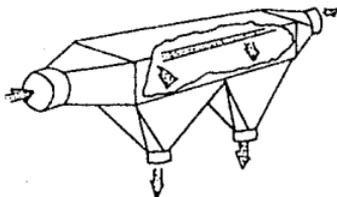


Figura 5

El flujo puede ser horizontal o vertical. El polvo puede reintegrarse al gas debido a la presencia de corrientes tipo remolino. En la cámara de polvo Howard, los anaqueles de platos horizontales se adicionan para acortar el camino de sedimentación de las partículas, incrementando la eficiencia de colección, pero hacen que la limpieza sea mucho más

difícil.

La cámara de sedimentación por gravedad es poco utilizada en la actualidad, pero puede diseñarse para aplicaciones específicas. El requerimiento de espacio es grande y la eficiencia es baja, por lo que se utilizan como prelavadores del gas que se alimentará a un colector más eficiente.

CAMARAS DE MAMPARAS.

En estos colectores, la sedimentación se favorece utilizando el momento generado por el cambio de dirección. El flujo de gas es dirigido hacia abajo a través de una cámara que contiene una mampara alrededor de la cual el gas es deflectado, mientras que las partículas grandes de polvo tienden a continuar moviéndose hacia abajo hasta ser colectadas en una tolva que después es removida (Fig 6).

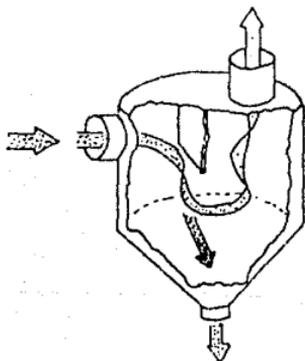


Figura 6

Este colector necesita menos espacio que la cámara de sedimentación normal y tiene una eficiencia similar.

CAMARAS SEPARADORAS.

En estos colectores la corriente de gas sucio entra en forma tangencial a un tubo en espiral, el polvo es llevado a la periferia por su inercia. El gas sucio concentrado es separado mediante ranuras y llega a una tolva de polvo o a un colector secundario. La corriente de gas limpio que sale de la tolva se combina con la que deja la cámara en espiral.

Los colectores secos de mediana eficiencia como estos, tienen una corriente de salida de gas que no satisface la mayoría de los requerimientos de la colección de polvo, por lo que se necesita un colector secundario. La cámara separadora se utiliza para reducir la carga de partículas gruesas que se acarrean al colector secundario.

COLECTOR TIPO LUCERNAS.

El gas pasa hacia el interior del equipo a través del extremo de un cono y debe dar un cambio agudo en su dirección para poder pasar a través de las ranuras o aberturas de las paredes. Las partículas más grandes son acarreadas por la inercia hacia el angosto final de la cámara donde son purgadas con una pequeña fracción de la corriente de gas (Fig. 7).

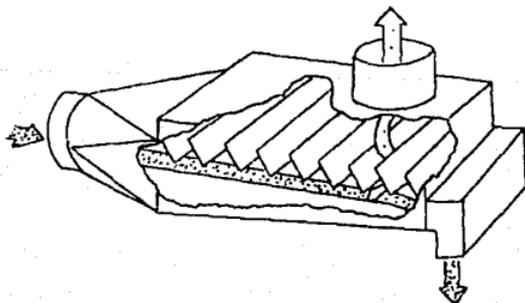


Figura 7

Este colector debe estar seguido por un colector secundario, como un ciclón de alta eficiencia, para separar el polvo del gas. Se han utilizado colectores de lucernas de forma de cono seguidos por cámaras de baffles para polvo grueso, seguidas a su vez por ciclones para polvo fino. El gas de purga, usualmente menor al 10 %, se regresa al interior del colector de lucernas y es reciclado.

CICLONES.

En los arreglos más comunes, el gas entra al ciclón en forma tangencial por la parte superior de la sección cilíndrica y gira hacia abajo hasta la sección inferior, la cual generalmente es de forma cónica. Las partículas de polvo, que tienen una fuerza centrífuga aplicada mayor que la de las moléculas de gas, se acumulan en las paredes y son llevadas hacia abajo separándose de las paredes por la velocidad del gas. En el fondo del ciclón el gas se separa del polvo, fluyendo hacia arriba en una pequeña espiral y sale por la parte superior. Los sólidos son colectados en una tolva y removidos por una válvula giratoria, un transportador de tornillo, o por otros medios (Fig. 8).



Figura 8

Los ciclones son uno de los colectores más ampliamente utilizados. La unidad tiene un costo bajo, no tiene partes móviles y puede ser construido con una cubierta refractaria para altas temperaturas (arriba de 1250 K). Los arreglos comunes con entrada tangencial, y salida axial de polvo y de gas limpio se muestran en el diagrama esquemático de la Fig. 8.

Las unidades pueden diseñarse para altas capacidades de polvo con eficiencia y caída de presión medias. Pueden obtenerse altas eficiencias utilizando diámetros pequeños y altas velocidades, las cuales generan altas caídas de presión. Las unidades pueden instalarse en paralelo para tratar grandes flujos de gas y en serie para obtener grandes eficiencias (o para obtener las dos condiciones, en combinaciones serie - paralelo).

Los ciclones pueden tener varias configuraciones y operan con el mismo principio básico de separación centrífuga. La entrada de gas puede ser tangencial o axial. La salida de gas puede ser axial o axial combinada con un equipo recuperador de presión. La salida de polvo puede obtenerse con una purga de gas o solamente de sólidos, con una configuración axial o periférica. La cámara separadora, los ciclones de tubos múltiples y los ciclones de flujo unido son variaciones del diseño estándar.

CICLONES MÚLTIPLES.

Como los ciclones de diámetro pequeño son más eficientes que los de diámetro mayor (la fuerza centrífuga para una velocidad tangencial dada varía inversamente al radio del ciclón), conjuntos de pequeños ciclones (254 mm o menos) son arreglados en paralelo con la alimentación de gas desde una cámara común.

La mayor ventaja de estos colectores es su gran eficiencia - la desventaja es el taponamiento de los pequeños tubos.

Los pequeños ciclones individuales no operan tan eficientemente en una instalación múltiple como lo harían por sí mismos. Esta diferencia se origina por una mala distribución de gas desigual a la entrada y la recirculación de gas desde la tolva de polvo hacia la salida del gas. Como consecuencia, los ciclones múltiples se obtienen como una unidad completa para asegurarse de tener un buen diseño (Fig. 9).

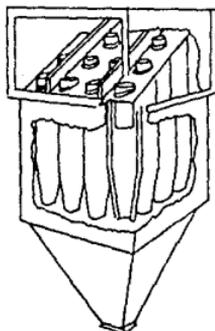


Figura 9

COLECTORES DE IMPACTO.

En este tipo de colectores la velocidad del gas se incrementa en un Venturi y el momentum de la partícula la acarrea a través de las ranuras hasta un plato liso de donde caen hasta un colector. Las partículas de polvo son colectadas en la superficie mientras que la corriente de gas se divide alrededor del plato (Fig. 10).

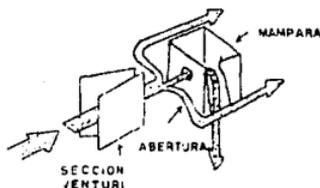


Figura 10

La colección de neblinas se simplifica con este colector debido a que el líquido se desliza sobre el plato. Estos equipos pueden requerir de golpeadores que remuevan el polvo que se acumula en las superficies. Si los sólidos son pegajosos, las superficies deben lavarse en forma continua con agua; esta película además de limpiar la superficie previene que las partículas removidas se reincorporen a la corriente de gas.

COLECTOR DINAMICO.

Este colector es un ventilador que tiene un impulsor con un diseño especial que emplea la fuerza centrífuga para coleccionar las partículas en la periferia, donde son retiradas en una corriente concentrada.

Lo más notable de este colector es el pequeño espacio que necesita y su baja caída de presión. El colector dinámico actúa como un verdadero ventilador, si bien su eficiencia es baja, 40 a 50 % contra 60 a 65 % para un ventilador diseñado simplemente para un servicio.

2.4 DESCRIPCION DE COLECTORES HUMEDOS.

Los colectores húmedos, mejor conocidos como lavadores de gases, recuperan el producto en forma de lodo o solución.

los cuales requieren de un procesamiento posterior para obtener el producto o para ser desechados.

En un lavador húmedo:

- El gas es enfriado y lavado.
- Pueden removerse gases tan eficientemente como partículas.
- Los gases corrosivos pueden neutralizarse escogiendo adecuadamente el medio lavador.
- Los afluentes de chimeneas usualmente pueden limpiarse, pero contienen polvos no humedecibles, nieblas y humos.
- La temperatura y contenido de la mezcla de gas a la entrada son esencialmente ilimitados.
- Deben considerarse condiciones de congelamiento.
- Se reducen los riesgos de mezclas explosivas polvo - aire.
- El equipo ocupa solo un espacio moderado.

La eficiencia varía con la potencia suministrada y puede extenderse sobre un amplio intervalo dependiendo del diseño. El tamaño del equipo y el costo inicial son razonables, pero el costo de operación es alto, especialmente con equipos de alta eficiencia, los cuales requieren un gran consumo de potencia.

Debido a su gran importancia en los procesos industriales, este tipo de colectores se describirán en el capítulo 3.

2.5 FILTROS DE TELA.

Algunas características funcionales de los filtros de tela son similares a las de los colectores inerciales: el producto es colectado en condiciones utilizables, el gas limpio no es enfriado y pueden crearse problemas secundarios en el manejo del polvo recuperado. Sin embargo, los filtros de tela pueden manejar partículas mucho más pequeñas con altas eficiencias. La temperatura está limitada por los tejidos empleados. El contenido de humedad es limitado

debido a que las zonas frías de condensación pueden apelmazar los sólidos y causar corrosión.

Los filtros para la limpieza de gases industriales son de tipo bolsas o de tipo envoltura, con una tela tejida o de fieltro, y pueden estar hechos de fibras naturales o sintéticas. El gas sucio fluye a través de poros medianos y las partículas se depositan en los huecos. Conforme los huecos se llenan y se forma una costra en la superficie del tejido, la caída de presión se incrementa hasta un punto en el cual los sólidos deben ser removidos.

Los filtros se utilizan para obtener alta eficiencia, + 90 %, en partículas pequeñas en el intervalo de las submicras. Los filtros pueden continuar funcionando efectivamente aun cuando las propiedades del gas y las condiciones de proceso varien. Los costos son moderados.

Su principal limitación es la temperatura, la cual debe ser de 1295 K (550 °F) como máximo. Enfriar un gas sucio muy caliente puede ser adecuado, pues permite utilizar un filtro de tela. Si el gas se encuentra abajo de su punto de rocío, calentarlo unos 27 o 42 K (50 a 75 °F) sobre el punto de rocío puede facilitar el uso de una unidad seca. El requerimiento de espacio es grande, pero puede ser aceptable debido a que el material recuperado está seco y listo para un uso posterior (a diferencia de los lavadores húmedos).

FILTROS CON LIMPIEZA INTERMITENTE.

Un tipo de filtro es limpiado en forma intermitente, parando el proceso y utilizando sacudidores o chorros de aire en sentido contrario al flujo para remover el polvo colectado. Otro tipo opera en forma continua pero con una limpieza secuencial de un compartimiento aislado después de otro. Conforme el compartimiento que contiene el filtro es limpiado, se coloca en línea de nuevo. Estos filtros operan con relaciones volumen de aire/ área de tejido de 0.45 a

0.91 $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ (1.5 a 3 cfm/ft^2) de área de filtro, o en términos de velocidad, de 0.45 a 0.91 m/min (1.5 a 3 ft/min). El medio filtrante son telas tejidas escogidas para la resistencia térmica, química y mecánica.

FILTROS CON LIMPIEZA CONTINUA.

La limpieza continua de los medios filtrantes que no tienen ninguna parte del equipo aislada, se lleva a cabo utilizando un anillo golpeador móvil o con chorros de aire en sentido contrario a la dirección de flujo del aire sucio. Estos métodos de limpieza son tan completos y dejan tan pequeña cantidad de polvo, que las telas tejidas no deben usarse pues son tan porosas que tienen pérdidas de eficiencia hasta que tienen retenida una buena cantidad de polvo; por lo tanto, se emplean telas de fieltro. Se utilizan intervalos de flujo de aire de 4.57 m/min (15 ft/min) y dan como resultado equipos más compactos. Esta clase de filtros permite cargas de polvo mayores, pero es más complejo, por lo que tiene mayores costos iniciales y de mantenimiento (Fig.11 a,b).

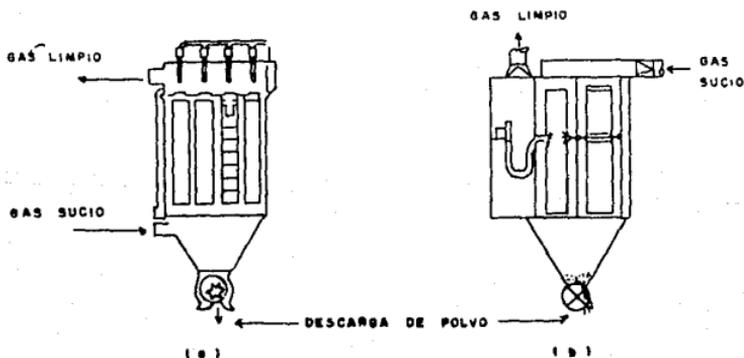


Figura 11

2.6 PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS.

El precipitador electrostático tiene la ventaja de permitir la colección en seco, y es altamente eficiente para partículas pequeñas. Un filtro de tela puede ser una primera elección, a menos que la corriente de proceso esté caliente o sea corrosiva. Si las partículas son gruesas, un lavador húmedo es bajo en costo. Pero la caída de presión para el filtro o lavador puede ser más alta que para el precipitador, y los costos de operación del lavador son además mayores. El costo capital de un precipitador electrostático es usualmente el más alto de todos los colectores, pero debe hacerse una comparación económica completa para decidir su uso.

El funcionamiento de un precipitador es el siguiente: el gas que se encuentra entre un electrodo de alto voltaje y un electrodo a tierra (o cargado opuestamente) se ioniza (fig 12). Las partículas de polvo se cargan por los iones del gas y migran al electrodo colector a tierra, donde se adhieren. Las neblinas corren sobre la superficie colectoras, con frecuencia ayudadas por la adición de corrientes irrigadoras. Los sólidos son removidos más comúnmente mediante el golpeteo con martillos o vibradores, sin embargo la remoción puede hacerse lavando o raspando los sólidos. Los precipitadores de tipo tubo son utilizados para flujos de neblina o agua, y los tipo platos se utilizan para la colección en seco y grandes flujos de gas.

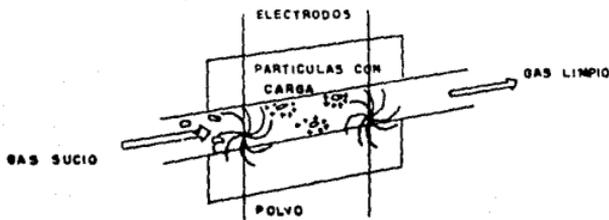


Figura 12

Aunque existen diversos usos para los precipitadores electrostáticos y los fundamentos están bien desarrollados, probar una aplicación de un precipitador es siempre preferible, debido a que las propiedades de las partículas pueden variar de una a otra instalación y la eficiencia teórica nunca se consigue. Algunas aplicaciones comunes son: la colección de cenizas del aire en calderas de carbón pulverizado, polvos de cementeras, neblinas de ácido sulfúrico, polvo catalítico en refinerías de petróleo, y polvo de los altos hornos de las acerías.

La eficiencia es alta. El intervalo de temperatura de operación va de 305 a 1565 K (0 a 700 °F), aunque han sido diseñadas unidades para temperaturas de 179 o 2105 K (- 70 o + 1000 °F). La caída de presión es pequeña debido a las bajas velocidades, pero se necesita una instalación grande.

En consideración a la precipitación electrostática, la característica más importante de un polvo es su conductividad eléctrica. La conductividad del polvo debe encontrarse entre la de un buen conductor tal como un metal sólido, y la de un buen aislador eléctrico, y no estar cerca de ninguno de los extremos. El recíproco de la conductividad, la resistividad eléctrica, se utiliza para definir esta propiedad. Para la operación más efectiva de un precipitador, la resistividad del polvo debe estar entre 10^4 y 10^{10} ohm-cm. Las partículas con una baja resistividad eléctrica rápidamente pierden su carga en el electrodo colector, sólo para reintegrarse a la corriente. Por otro lado, los materiales con alta resistividad eléctrica envuelven y aíslan el electrodo colector, con lo que se reduce el potencial a través de la corriente de gas; esto puede llevar a una descarga eléctrica que invierta la ionización y cause la reincorporación del polvo. Agentes condicionantes tales como la humedad, neblinas ácidas y amoníaco pueden ayudar a reducir la resistividad de la corriente de gas que se tratará.

2.7 OTROS EQUIPOS.

Existen otros dispositivos que no son propiamente colectores de partículas, sino que se utilizan para disminuir la cantidad de polvos tóxicos presentes en la corriente de gas, convirtiéndolos en sustancias inocuas para la salud.

DISPOSITIVOS DE INCINERACION CON FLAMA DIRECTA.

Estos dispositivos encuentran aplicaciones en aquellos procesos en los que los desechos son polvos combustibles, nieblas o gases solubles que pueden ser quemados para generar productos de combustión inocuos. La combustión usualmente requiere la adición de combustible extra para mantener una temperatura de cámara adecuada.

El incremento de la eficiencia térmica del incinerador puede lograrse por medio de la recirculación del gas que deja la cámara de combustión y agregando un precalentador para la alimentación.

DISPOSITIVOS DE INCINERACION CATALITICA.

Estos dispositivos se utilizan en condiciones de muy bajos porcentajes de material combustible presentes en la corriente de gas, cuando el costo del combustible es prohibitivo, o donde no es posible tener temperaturas muy elevadas.

Estos dispositivos requieren sistemas de control más sofisticados que los de flama directa.

2.8 CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCION.

Las principales características de un colector que deben tomarse en cuenta para su elección y que constituyen las ventajas y desventajas que tiene un tipo con respecto a otro para determinada operación son:

- Eficiencia de colección
- Requerimientos de energía
- Costo inicial
- Costo de operación
- Facilidad de operación y mantenimiento

En general, la selección del equipo utilizado para remover partículas de gas depende del tamaño de las partículas (fig. 13):

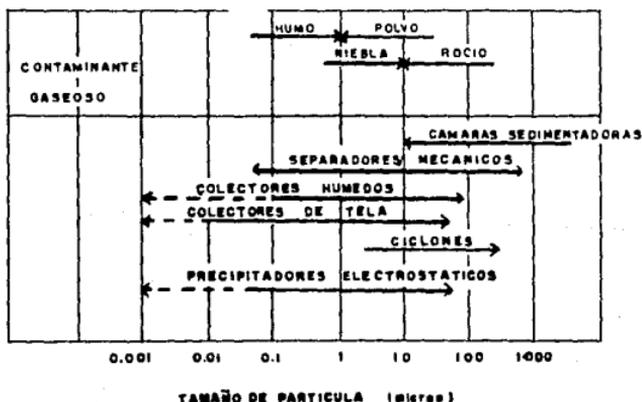


Figura 13

a) La neblina menor de 10 micras de diámetro y a bajas concentraciones puede removerse con un precipitador electrostático, un lavador de gases, un filtro de bolsas de alta densidad o un lecho empacado.

b) El rocío mayor de 10 micras en tamaño y concentraciones mayores de 2.29 g/m^3 (1 gr/ft^3) puede ser removido con separadores inerciales, filtros de bolsas o lechos empacados.

c) Las partículas submicrónicas pueden eliminarse con colectores húmedos de alta energía, precipitadores electrostáticos o filtros de bolsas.

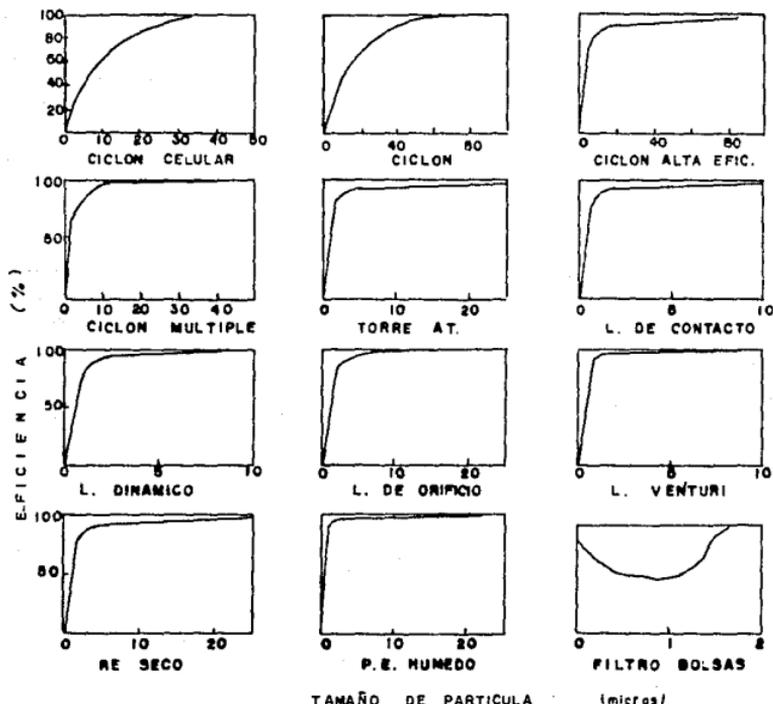
d) El polvo de tamaño entre 1 y 10 micras puede limpiarse con colectores húmedos y separadores mecánicos o inerciales.

e) Los polvos mayores de 10 micras son eliminados con cámaras de sedimentación o ciclones.

Puede hacerse también una selección preliminar utilizando las curvas de eficiencia contra tamaño de partícula que se quiere coleccionar, para los diferentes equipos disponibles.

En la figura 14 se presentan las curvas de eficiencia para los colectores más comunes [17].

CURVAS DE EFICIENCIA



TAMAÑO DE PARTICULA

Figura 14

Existen algunas reglas para seleccionar el equipo de coleccion, sin embargo, la seleccion final requiere evaluaciones de las condiciones del proceso y otras consideraciones.

2.9 FUERZA DE COLECCION.

Los colectores más comunes pueden clasificarse de acuerdo a la naturaleza de la fuerza de coleccion y la superficie de coleccion, como se muestra en la tabla III [11].

TABLA III
FUERZA

COLECTOR SUPERFICIE

COLECTORES DE SUPERFICIE LIMITE

Cámara de sedimentación	Gravitacional	Plana
Momentum	Gravitacional Inercial	Plana o cilíndrica
Ciclón	Centrífuga	Cilíndrica
Precipitador electrostático	Electrostática	Plana o cilíndrica
Colector térmico	Termoforesis	Plana
Colector de contacto	Inercial	Plana

COLECTORES TIPO BLANCO

Filtro	Inercial	Fibra cilíndrica o granular
	Difusional	
	Intercepción directa	
	Electrostática	
Lavador	Inercial	Esférica o irregular
	Difusional	
	Intercepción directa.	

2.10 APLICACIONES DEL EQUIPO.

Los diferentes tipos de colectores de polvo se presentan en la Tabla IV, la cual simplifica los campos de aplicación de los colectores. Los intervalos y límites tabulados son valores típicos pero naturalmente varían grandemente para aplicaciones poco usuales.

CAPITULO 3

DESCRIPCION DE LAUADORES DE GASES

DESCRIPCION DE LAVADORES DE GASES

Un lavador de gases puede definirse como un dispositivo que utiliza un medio líquido para separar sólidos de corrientes de proceso. Sin embargo también puede disolver componentes gaseosos obteniéndose así dos formas de purificación simultáneas.

3.1 EL SISTEMA DEL LAVADOR.

El sistema completo de un lavador incluye un número de componentes esenciales para su operación. Estos elementos son: la campana de extracción y el ducto que conduce el gas hacia el lavador, la estructura de soporte del lavador y sus apoyos, el separador de entrada, el ducto al ventilador, el ventilador mismo y la chimenea. La fig. 15 muestra en un diagrama esquemático las partes que deben ser consideradas en el sistema del lavador (3).

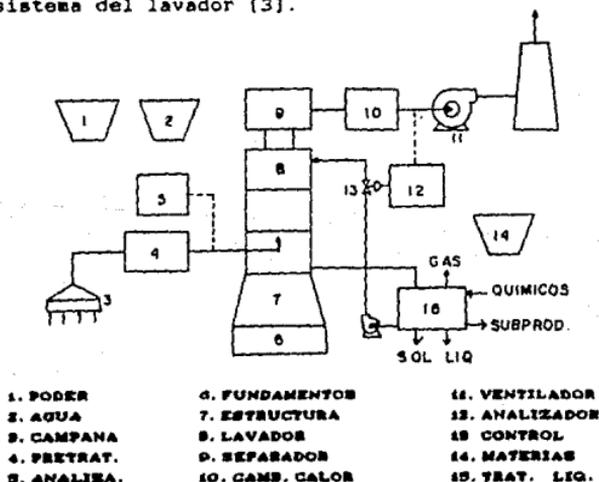


Figura 15

Si el gas se encuentra caliente, debe ser enfriado antes de que tenga contacto con los componentes del lavador o de los ductos pues no resisten las altas temperaturas. Generalmente se utilizan espumas para este propósito y es recomendable utilizar agua limpia a alta presión (70.3 KPa) a fin de obtener gotas finamente atomizadas y una rápida transferencia de masa y calor. Las paredes de los ductos pueden revestirse con depósitos de sólidos en las expansiones y conexiones de los ductos, por lo que deben de tomarse medidas para mantener limpias las paredes.

Los fabricantes de lavadores ofrecen una gran variedad de productos. Los equipos se encuentran disponibles en un amplio rango de diseños, tamaños, capacidad de operación, y costos iniciales y de operación. Escoger el lavador adecuado para un trabajo en particular requiere que se entiendan las alternativas que presentan distintas unidades.

3.2 TIPOS DE LAVADORES.

Existen muchas clases de dispositivos de lavado. Para propósitos de diseño se agrupan en dos clases principales:

- a) Los que utilizan superficies húmedas de diversos tipos como medio de colección.
- b) Los que utilizan las gotas de líquido como blanco de colección.

Algunos lavadores son diseñados principalmente para la colección de partículas, y otros para la transferencia de masa. Como se necesita un buen contacto líquido-gas para ambas operaciones, todos los lavadores pueden coleccionar partículas y gases en cierta cantidad. El grado en el que la colección de partículas y la transferencia de masa característicos de un lavador pueden ser explotados, lo

mismo que el costo asociado, determinarán que tan apropiado es el lavador para un trabajo con requerimientos de purificación específicos. Los lavadores se han agrupado en las siguientes categorías: con platos, empaque macizo, empaque fibroso, rocío preformado, rocío generado con gas, centrifugos, mamparas, impacto y arrastre, ayuda mecánica, lecho movedizo y combinaciones [3].

LAVADORES CON PLATOS.

Un lavador con platos consiste de una torre vertical con uno o más platos (bandejas) montados transversalmente en su interior. El gas entra por el fondo de la torre y debe pasar a través de las perforaciones, válvulas, ranuras u otras aberturas que se encuentran en cada plato, antes de salir por la parte superior. Usualmente, el líquido se introduce en el plato superior y fluye sucesivamente a través de cada plato mientras se mueve hacia abajo hasta que el líquido sale por el fondo. El gas que pasa a través de las aberturas de cada plato, se mezcla con el líquido que fluye sobre él. El contacto gas-líquido causa la transferencia de masa o la remoción de las partículas para la que fue diseñado el lavador.

La figura 16 muestra diversos tipos de platos y una torre.

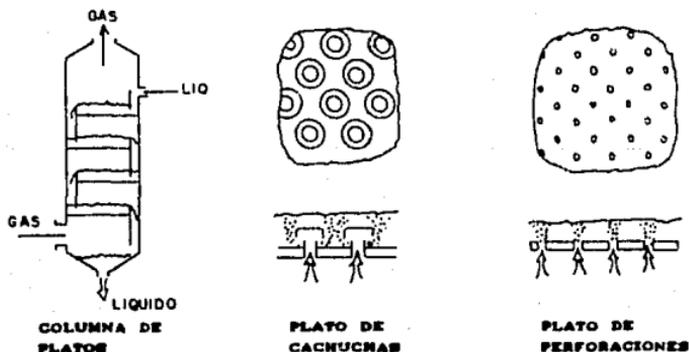


Figura 16

En algunos diseños se colocan mamparas de choque a corta distancia sobre cada perforación del plato, formando un plato de impacto (fig. 17). Las mamparas de choque se encuentran abajo del nivel del líquido en los platos perforados, y por esta razón son lavadas continuamente removiendo las partículas colectadas. El mecanismo principal de la colección de partículas es el impacto inercial del chorro de gas que choca en el líquido o en las partes sólidas. La colección de partículas puede ser facilitada por la atomización del líquido que fluye fuera de las aberturas en el plato perforado irrigado. La eficiencia de colección se incrementa conforme disminuye el diámetro de las perforaciones y puede proporcionar un diámetro de corte de aproximadamente 1.0 micra para una agujero de 31.75 mm (1/8 in) de diámetro en un plato perforado.

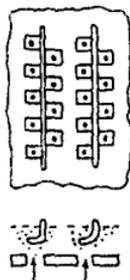


Figura 17

Se sabe que las columnas de platos son más eficientes para la transferencia de masa mientras más platos tengan. Esto generalmente no se aplica para la colección de partículas cuando están presentes diferentes diámetros de partículas. Un plato no tiene la misma eficiencia para todos los tamaños de partículas, más bien, muestra un cambio agudo en la eficiencia cerca del diámetro de corte. Una vez que las partículas más grandes que este tamaño han sido removidas del gas, los platos adicionales pueden ofrecer muy poco beneficio adicional. Esta clase de comportamiento es

característico de muchos tipos de lavadores y debe tomarse en cuenta cuando se piensa colocar dos lavadores en serie.

La capacidad, arrastre, caída de presión y propiedades de estabilidad de un lavador con platos son similares a las de las torres para absorción de gases y destilación. Se debe tener cuidado al seleccionar platos para sistemas que tengan cierta tendencia a que los sólidos se adhieran a los platos, ocasionando que las perforaciones se tapen.

EMPAQUE MACIZO.

Los lechos empacados o lavadores de torre son más conocidos como absorbedores de gases o fraccionadores, y pueden ser utilizados también como lavadores de partículas. Estos lavadores pueden empacarse con diferentes elementos manufacturados, tales como empaques tipo anillo o silla de montar, o con materiales comunes disponibles, tales como roca molida. El contacto gas-líquido puede obtenerse utilizando flujos paralelos, a contracorriente o con flujo cruzado. La colección de niebla en los lechos empacados, con su subsecuente desagüe, puede completarse sin un flujo adicional de líquido.

La colección en el empaque trabaja principalmente por depósito centrifugo, debido a que el flujo de gas sigue un movimiento circular al pasar a través de los espacios de los poros, y por impacto inercial debido al choque del chorro de gas dentro del lecho. Puede obtenerse una buena eficiencia de colección de partículas por difusión si las partículas son lo suficientemente pequeñas.

La eficiencia de colección para partículas en el intervalo de tamaño inercial (mayores de 0.3 micras) se incrementa al disminuir el tamaño del empaque. Un diámetro de corte cercano a 1.5 micras puede obtenerse utilizando columnas empacadas con sillas Berl o anillos Raschig de 25.4 mm (1 in). Los empaques más pequeños dan eficiencias más grandes.

Un empaque de 12.7 mm (1/2 in) puede obtener un diámetro de corte de 0.7 micras con una velocidad de gas de 9.14 m/s (30 ft/s). La forma del empaque no parece ser muy importante en lo que se refiere a la eficiencia de colección.

El empaque está sujeto a obturamiento, pero puede ser removido mediante la limpieza. Las limitantes de temperatura son de especial importancia cuando se utilizan empaques plásticos. Por otra parte, la corrosión tiene un severo efecto en los empaques metálicos.

EMPAQUE FIBROSO.

Los lechos de fibra pueden emplearse en distintas configuraciones para la colección de partículas (fig. 18).

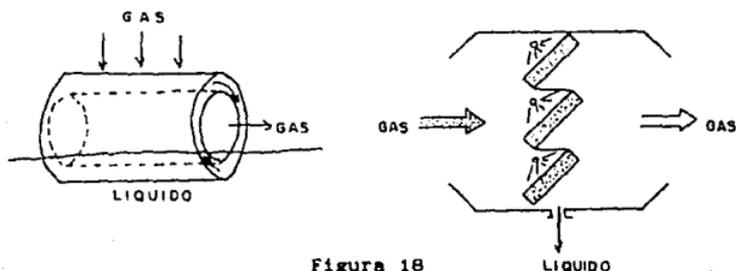


Figura 18

Las fibras pueden estar hechas de materiales tales como plástico, fibra de vidrio y acero. El empaque fibroso usualmente tiene una gran fracción de huecos del orden del 97 - 99 %. Las fibras deben de tener un diámetro pequeño para tener una operación eficiente, pero deben ser lo suficientemente fuertes para soportar las partículas colectadas o las gotas sin que se compacten las fibras. La corriente de líquido remueve el material colectado de las fibras en un arreglo que puede ser paralelo, a contracorriente, o flujo cruzado, similares a los del empaque macizo.

La colección sucede por impacto inercial causado por el flujo de gas alrededor de las fibras. La eficiencia se incrementa al ir disminuyendo el diámetro de las fibras y conforme la velocidad del gas se incrementa. La colección difusional puede ser importante para partículas muy pequeñas, y la eficiencia en este mecanismo puede mejorar al disminuir la velocidad del gas que pasa a través de un lavador dado. Los diámetros de corte pueden ser tan bajos como 1.0 o 2.0 micras para malla de alambre anudado, con alambre de 2.79 mm (0.011 in) de diámetro, y de alrededor de 0.5 micras para alambre muy fino y/o alta velocidad de gas.

Los lechos fibrosos son muy susceptibles de obturarse y pueden ser imprácticos donde persiste la formación de escamas y las condiciones favorecen el depósito de los sólidos suspendidos. Obviamente también son especialmente sensitivos a ataques químicos, mecánicos y térmicos. Los lavadores de lecho fibroso son ampliamente utilizados ya que la mayoría de las desventajas expuestas pueden evitarse.

ROCIO PREFORMADO.

Un lavador de rocío preformado colecta partículas o gases en gotas de líquido que han sido atomizadas por boquillas rociadoras. Las propiedades de las gotas están determinadas por la configuración de las boquillas, el líquido que será atomizado y la presión en la boquilla. El rocío que deja la boquilla está dirigido hacia una cámara que ha sido diseñada de modo que conduzca al gas a través de las gotas atomizadas. Se utilizan patrones de flujo horizontales y verticales, y el flujo de entrada del rocío puede ser paralelo, a contracorriente o flujo cruzado con respecto al gas (fig. 19). Si la torre es vertical, la velocidad relativa entre las gotas y el gas es finalmente la velocidad de sedimentación terminal de las gotas.

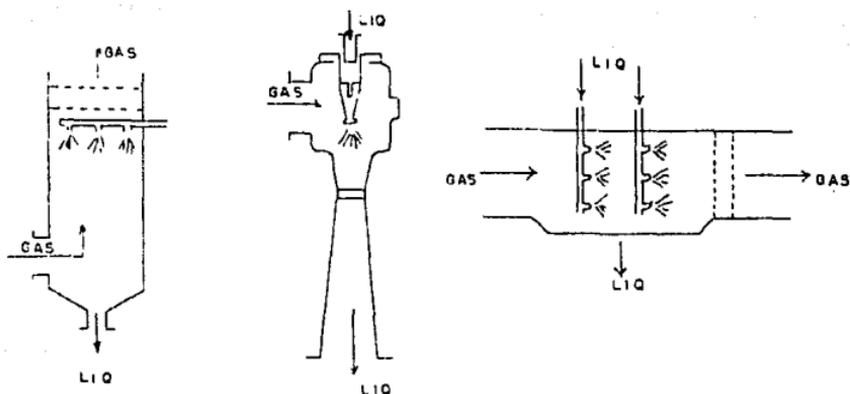


Figura 19

Los eyectores Venturi son equipos de rocío preformado en los cuales se utiliza rocío de alta presión para coleccionar las partículas y mover el gas. La alta velocidad relativa entre las gotas y el gas ayuda a la separación de las partículas. Los rocíos preformados han sido instalados también en lavadores Venturi que utilizan un ventilador para proveer la gran caída de presión de la fase gaseosa.

La colección de partículas en estas unidades es resultado del impacto inercial en las gotas. La eficiencia es una compleja función del tamaño de las gotas, la relación líquido-gas, la velocidad del gas y la trayectoria de las gotas. Generalmente existe un diámetro óptimo de gotas que varía con los parámetros de flujo de líquido. Para gotas que caen a la velocidad terminal de sedimentación, el diámetro óptimo de gota para la colección de partículas finas es de 100 a 500 micras; para gotas moviéndose a alta velocidad a pocos pies de la espesa, el diámetro óptimo es menor.

Los lavadores de rocío que toman ventaja de la sedimentación gravitacional pueden lograr diámetros de corte cercanos a 2.0 micras con relaciones líquido-gas moderadas.

Los rocíos a alta velocidad pueden reducir el diámetro de corte hasta 0.7 micras. La eficiencia mejora con presiones más altas en las espesas y relaciones líquido-gas más grandes.

Los lavadores de rocío son prácticamente inmunes a obturaciones en el lado del flujo de gas, pero están sujetos a serios problemas en el lado del líquido. La relación líquido-gas requerida es alta, usualmente del orden de 0.1135 a 0.3785 m³/28.32 m³ de gas tratado (30 a 100 gal/1000 ft³ de gas), dependiendo de la eficiencia.

El líquido que se recircula del lavador puede erosionar y corroer las boquillas, la tubería y las bombas. Las boquillas pueden obturarse con pedazos de escamas o con aglomeraciones de partículas. Por su naturaleza, el rocío genera una pesada carga de líquido que se asienta, la cual debe ser colectada. La caída de presión de la fase gaseosa (ΔP) es generalmente baja.

ROCIO GENERADO CON GAS.

Los equipos de rocío generado con gas utilizan una corriente de gas en movimiento para primero atomizar el líquido en gotas, y después acelerar las gotas. Típico de estos equipos es el lavador Venturi y los diferentes lavadores de tipo "orificio". Altas velocidades de gas de 60 - 120 m/s (200 - 400 ft/s) elevan la velocidad relativa entre el gas y las gotas del líquido y promueve la colección de las partículas. Muchos lavadores de rocío generado con gas incorporan las secciones convergentes y divergentes típicos de los lavadores Venturi, pero esta modificación aparentemente no aporta mucho beneficio. Diferentes geometrías han sido utilizadas exitosamente como la ilustrada en la fig. 20.

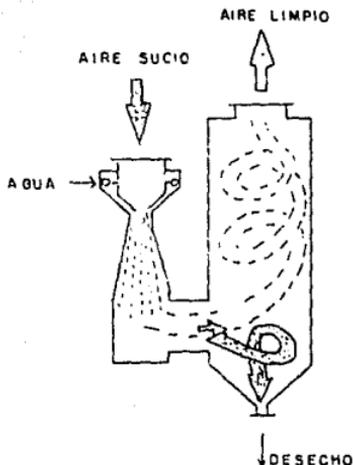


Figura 20

El líquido puede introducirse en diferentes lugares y de distintas maneras sin que esto tenga mucho efecto en la eficiencia de colección. Usualmente, éste se introduce a la entrada de la garganta por medio de varias boquillas de tubo recto dirigidas radialmente en el interior. Otros diseños de rocío generado con gas distribuyen una película de líquido sobre las paredes del lavador corriente arriba desde la garganta.

La colección de las partículas es el resultado del impacto inercial debido al flujo del gas alrededor de las gotas. La velocidad es tan alta (y el tiempo de residencia de las gotas tan corto) que la colección difusional y depósito por otras fuerzas, como la electrostática, no son muy efectivas. La eficiencia se incrementa con la velocidad en la garganta y la relación líquido-gas. Debido a que debe haber suficiente líquido para una limpieza efectiva de la corriente de gas, es una buena práctica el utilizar una relación líquido-gas alta antes que una velocidad alta de gas para obtener un diámetro de corte dado. Se debe

especificar una relación de por lo menos $0.2422 \text{ m}^3/28.32 \text{ m}^3$ (8 gal/1000 ft³). Diámetros de corte de 0.2 micras han sido obtenidos con lavadores Venturi.

Los lavadores de gas atomizador tienen las configuraciones más simples y pequeñas de todos los lavadores. Mientras que es difícil que se obturen, son susceptibles a la erosión debido a la alta velocidad en la garganta. Estos lavadores pueden ser contruidos con una apertura ajustable en la garganta para permitir la variación de la caída de presión y la eficiencia de colección. Se utilizan relaciones líquido-gas que varían de 0.00757 a $0.056 \text{ m}^3/28.32 \text{ m}^3$ (2 a 15 gal/1000 ft³). Todo este líquido se introduce y debe ser removido del gas. En general, el separador es mucho más largo que el lavador de gas atomizador.

LAVADORES CENTRIFUGOS.

Los lavadores centrifugos, usualmente de forma cilíndrica, imparten un movimiento de giro al gas que pasa a través de él. El giro puede provenir de la introducción del gas en forma tangencial en el lavador, o de la dirección de la corriente de gas por aspas estacionarias. En un colector centrifugo seco (ciclón), las paredes pueden mojarse para impedir la reincorporación de las partículas que se colecten, y lavar los depósitos. Usualmente el rocío es dirigido a través de la corriente giratoria de gas para atrapar las partículas por impacto en las gotas. El rocío puede dirigirse hacia afuera desde un rociador central, o hacia adentro desde las paredes del colector, como se muestra en la fig. 21. Las conexiones de rocío dirigidas hacia el interior desde las paredes son más útiles ya que son más accesibles desde el exterior del lavador.

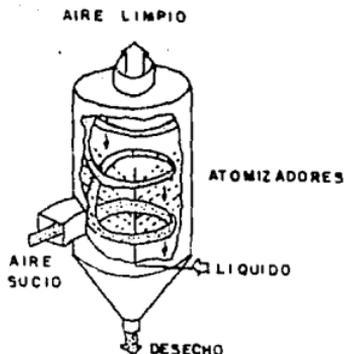


Figura 21

La colección de partículas opera mediante depósito centrífugo ocasionado por la rotación de la corriente de gas. En la ausencia de rocío, la eficiencia será igual a la de un colector seco. Si se tiene demasiado rocío, el comportamiento del lavador es similar al de un lavador de rocío. En este caso, la eficiencia de colección de las gotas parece provenir del depósito centrífugo, y el mayor efecto del flujo giratorio es separar las gotas que entraron.

Diámetros de corte de 4.0 o 5.0 micras han sido obtenidos con lavadores centrífugos en ausencia de rocío. Cuanto más rocío se introduce o genera dentro, el comportamiento de la unidad se asemeja al de un lavador de rocío preformado.

Los lavadores centrífugos son de forma simple y no tienen intersticios pequeños. Por lo tanto no son muy susceptibles a obturaciones, no obstante los sólidos pueden depositarse en secciones de las paredes que no están adecuadamente lavadas. Si están apropiadamente diseñadas, las centrifugas tienen la ventaja de su construcción interna para la separación por asentamiento. La velocidad tangencial del gas no debe exceder de 30.48 m/s (100 ft/s), y la configuración interna debe prevenir el flujo del líquido en las paredes de la

salida del gas.

LAVADORES DE MAMPARAS Y FLUJO SECUNDARIO.

El equipo de colección tipo mampara ocasiona cambios en la dirección del flujo de gas y su velocidad por medio de superficies sólidas. La dirección principal del flujo puede ser alterada o pueden colocarse patrones de flujo secundario, como se muestra en la fig. 22. Las mamparas rectas, de "zig-zag", y de disco y dona, son ejemplos de superficies que producen cambios en la dirección del flujo. Si el material que se colectará es líquido, éste corre sobre la superficie de la mampara hasta caer y ser colectado. Si el material es sólido, las partículas colectadas deben ser lavadas en forma intermitente de los platos de impacto.

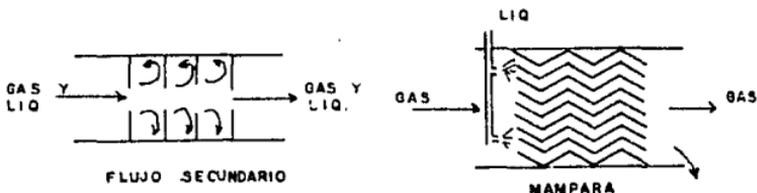


Figura 22

La colección de partículas sigue el depósito centrífugo causado por el cambio en la dirección del flujo principal, o por la rotación de los flujos secundarios. El desempeño potencial de las mamparas que ocasionan el cambio en la dirección del flujo, depende del radio de curvatura del patrón de flujo y en la extensión de la superficie de la mampara. De esta manera, el diámetro de corte puede ser tan bajo como 5.0 o 10.0 micras para arreglos continuos y discontinuos en "zig-zag" y similares.

La capacidad de colección de partículas finas de un lavador de mamparas es tan baja que no son aptos para esta

aplicación. Son útiles como prelavadores y como separadores por asentamiento. La carga de las partículas pesadas puede causar el depósito de sólidos, lo que ocasiona taponamiento y corrosión.

LAVADORES DE IMPACTO Y ARRASTRE.

Los lavadores de impacto y arrastre (de rocío autoinducido) presentan una cámara que retiene líquido, de tal manera que el gas que se introduce en el lavador choca en él y recorre la superficie del líquido al buscar el ducto de salida (fig. 23). Este contacto atomiza algo del líquido formando gotas que son arrastradas por el gas y actúan como una superficie para la colección de partículas y la transferencia de masa. El ducto de salida del gas está diseñado usualmente de tal manera que el cambio de dirección de la mezcla gas-líquido que fluye a través de él, reduzca el arrastre de las gotas.

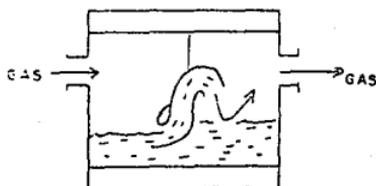


Figura 23

La colección de partículas se atribuye al impacto inercial causado por el choque del chorro de gas contra el líquido, y por el flujo del gas alrededor de las gotas atomizadas. El tamaño de gota y la relación de flujo líquido-gas dentro del lavador depende de la geometría del lavador y la proporción del flujo de gas, pero no son controlables o medibles.

Generalmente, el funcionamiento de un lavador de impacto y arrastre puede compararse con el de un lavador de gas atomizador que opere a la misma caída de presión de la fase

gaseosa. El diámetro de corte varía desde varias micras, para impacto a baja velocidad, hasta 0.5 micras para impacto a alta velocidad.

El flujo de líquido en este tipo de lavador es empujado por el gas de manera que los requerimientos de bombeo de líquido son, en su mayor parte, para ajustar y purgar las corrientes. El depósito de sólidos puede ocasionar problemas en el fondo y en porciones de la pared que no estén bien lavadas. Se requiere una buena separación del líquido arrastrado debido a la cantidad de rocío que se genera.

LAVADORES CON AYUDA MECANICA.

Los lavadores con ayuda mecánica incorporan un equipo motriz de impulso entre la entrada y la salida del cuerpo del lavador. A menudo el equipo motriz de impulso son ventiladores de palas, utilizados para mover el aire a través del lavador. Las partículas son colectadas debido al impacto sobre las paletas del ventilador conforme el gas se mueve a través del equipo. Usualmente, el líquido se introduce en el eje de rotación de las paletas del ventilador. Algo del líquido se atomiza debido al impacto con el ventilador, y otra parte se desliza sobre las paletas, limpiándolas de las partículas colectadas; la última porción se atomiza conforme deja el rotor del ventilador. El líquido es recapturado por la coraza del ventilador, que lo drena hasta un desagüe.

Los lavadores desintegradores tienen una unidad motriz de impulso que gira sumergida y atomiza el líquido en gotas pequeñas. Las gotas salen girando del impulsor a través de la corriente de gas, colectando las partículas en su camino. Los lavadores con ayuda mecánica son utilizados casi exclusivamente para la colección de partículas. Su capacidad de transferencia de masa es generalmente baja debido a la relativamente baja cantidad de líquido disponible para el contacto.

La fig. 24 muestra una configuración que ha sido utilizada como ayuda mecánica al flujo de fluidos. El líquido proveniente de los lavadores con ayuda mecánica usualmente puede ser recirculado.

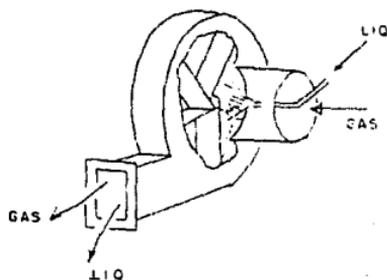


Figura 24

Los mecanismos de colección, en el orden probable de importancia, son: impacto inercial en el líquido atomizado, impacto inercial en los elementos del rotor y depósito centrífugo en la coraza. Diámetros de corte cercanos a 2.0 micras han sido obtenidos con equipos que tienen espesas finas y ventiladores con bajas revoluciones. Se puede obtener un diámetro de corte de 1.0 micra con un lavador tipo desintegrador.

Los lavadores con ayuda mecánica pueden suministrar la potencia necesaria en una manera que puede o no ser superior a utilizar ventiladores y/o bombas para líquidos en otros tipos de lavadores.

Al parecer, no existen ventajas en potencia para las unidades con ayuda mecánica sobre otros tipos. Los desintegradores requieren más potencia que un lavador de gas atomizador con eficiencias similares. Además, el impacto a gran velocidad del líquido, y el escurrimiento sobre las partes del lavador, promueven condiciones severas de abrasión y corrosión. Las partes giratorias están también

sujetas a vibraciones que inducen fatiga causada por el depósito de sólidos, o desbalanceo.

LAVADORES DE LECHO MOVEDIZO.

Los lavadores de lecho movedizo suministran una zona de empaque movedizo - usualmente esferas de plástico o vidrio - en la que el gas y el líquido pueden mezclarse íntimamente. La coraza del lavador sostiene una rejilla de soporte en la cual se coloca el empaque móvil. El gas pasa hacia arriba a través del empaque, mientras que el líquido es esparcido hacia arriba desde el fondo del lavador, v/o hacia abajo desde la parte superior del lecho movedizo, como se muestra en la fig. 25. Las velocidades del gas son suficientes para mover el material del empaque cuando el lavador está en operación. Este movimiento ayuda ocasionando la turbulencia del lecho y manteniendo los elementos del empaque limpios. Cuando se utilizan esferas huecas o de baja densidad, el lecho fluidiza y su espesor se extiende hasta cerca del doble que el del lecho en reposo.

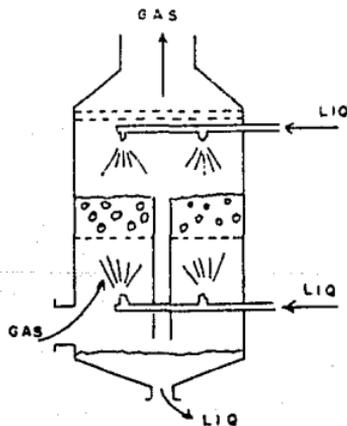


Figura 25

La colección de las partículas se debe a su impacto inercial contra el líquido atomizado y en los elementos del empaque. Pueden obtenerse diámetros de corte cercanos a 1.0 micra utilizando lechos fluidizados tipo "bolas de ping-pong" que tienen tres etapas en la torre del lavador. El funcionamiento de los lechos agitados menos violentamente del tipo "canica" se asemeja al de los lechos de empaque masivo a menos que la velocidad del gas sea tan alta que cause una atomización significativa del líquido y su arrastre desde el lecho.

Los lavadores de lecho movedido resultan benéficos donde se necesitan buenas características de transferencia de masa y de colección de partículas. La agitación limpia el empaque y reduce los problemas causados por el depósito de sólidos. El desgaste de las esferas puede ser severo, y la estabilidad hidrodinámica del lavador es limitada debido a los intervalos de fluidización y problemas de agitación.

LAVADORES DE DISEÑOS COMBINADOS.

Numerosas combinaciones de los tipos de lavadores descritos anteriormente han sido ideadas y utilizadas. Los híbridos que combinan las fuerzas de depósito de partículas han sido también desarrollados, algunos de los cuales son dignos de atención.

La condensación de vapor de agua causada por la adición de vapor a un gas saturado o por el lavado de un gas saturado con un líquido frío, provoca un incremento en la eficiencia. Las partículas deben crecer hasta varias micras de diámetro con el vapor adicionado, aumentando la eficiencia global del lavador. Sin embargo, el costo de obtención del vapor es generalmente prohibitivo a menos que prevalezcan condiciones especiales.

El lavar un gas caliente, húmedo, con un líquido relativamente frío puede ser económicamente atractivo si el

gas se encuentra lo suficientemente caliente. El que un lavador, operando con una caída de presión moderada, pueda obtener la misma eficiencia que un lavador Venturi de alta energía, operando a una caída de presión de 2.54 KPa (100 pulgadas columna de agua), depende de cuanta condensación ocurra. El diseño del lavador y su economía deben tratarse aparte para cada caso.

Los lavadores de incremento electrostático pueden ser muy eficientes, dependiendo de los parámetros de diseño y operación. Las variaciones posibles incluyen: precipitadores electrostáticos húmedos, lavadores tipo polvo-cargado/líquido sedimentado, lavadores tipo gotas-cargadas y tipo polvo-cargado/líquido-cargado. Los métodos de operación proyectados continúan en las etapas elementales para cualquier derivación de la geometría de un precipitador electrostático tradicional. Debido a esto, generalmente se estipulan ciertas pruebas piloto. Los problemas de corrosión y de aislamiento de voltaje pueden ser severos en esta clase de lavadores.

A continuación se presenta un ejemplo de lavadores de diseños combinados.

- Lavador de impacto:

En este lavador la corriente de gas, llevando tanto las partículas de polvo como las gotas de agua provenientes de rociadores preacondicionadores, pasa a través de platos perforados para chocar con las mamparas. La velocidad del gas hace que el agua se atomice en el plato perforado. Las partículas grandes son colectadas en separadores de niebla tipo aspas y son removidas junto con los sólidos colectados en el líquido del plato de impacto (fig. 26).

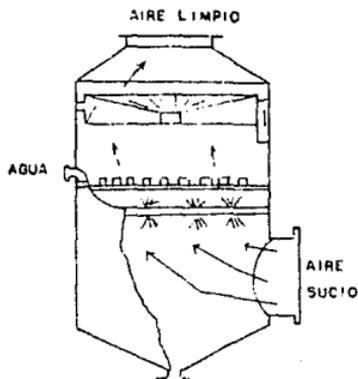


Figura 26

Este lavador es similar a una columna de platos perforados y usualmente tiene de uno a tres platos, aunque pueden ser más. Las etapas extra pueden adicionarse después. Cada perforación en el plato tiene una mampara o "blanco" arriba. El flujo es a contracorriente. La velocidad del gas en las perforaciones es alta (22.86 m/seg o más) y se utiliza para atomizar el líquido en el plato. El taponamiento de las perforaciones, las cuales deben ser de 6 mm (1/4 in) o menos, no es un problema si fue prevista, ya sea con la agitación, o con los rociadores preacondicionadores del gas. Gases solubles pueden removerse efectivamente al mismo tiempo que el polvo.

3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS LAVADORES MAS COMUNES.

Torres de platos (13):

VENTAJAS:

- Relaciones de flujo grandes con platos múltiples.
- Se puede lograr la remoción de polvo y absorción de gases simultáneamente.
- Es factible tener flujos de líquido grandes.

- Puede ser construido en tamaños grandes.
- Puede manejar fluctuaciones de volumen.
- Puede manejar fluctuaciones de temperatura.

DESVENTAJAS:

- No puede manejar líquidos espumosos.
- El diseño de resistencia a la corrosión es caro.
- No puede remover partículas finas.

Torres empacadas:

VENTAJAS:

- La eficiencia de absorción es grande.
- La construcción de resistencia a la corrosión es barata.
- Extensa experiencia de aplicación.
- Simplicidad de instalación.
- Disponible en tamaños estándar.

DESVENTAJAS:

- Baja remoción de partículas.
- Dificultad de acceso.
- Susceptible a formar escamas y ensuciamiento.
- Vulnerable a altas temperaturas.

Rocío preformado:

VENTAJAS:

- No requiere ventilador.
- Disponible en tamaños pequeños.
- Requiere poco espacio.
- Disponible en almacén.
- Disponible en distintos materiales de construcción.

DESVENTAJAS:

- Requerimiento grande de agua.
- Eficiencia limitada de colección de partículas.
- Baja eficiencia de absorción.
- La resistencia del sistema no debe ser muy grande.

Rocío generado con gas:

VENTAJAS:

- Gran eficiencia de remoción de partículas.
- Bajo potencial en formación de escamas.
- Resistencia a la temperatura y a la corrosión.
- El volumen y la presión pueden variarse automáticamente.

DESVENTAJAS:

- Elevado consumo de energía.
- Abrasión en el área de la garganta.
- Baja capacidad de absorción.
- Dificultad para seleccionar la caída de presión correcta.

Centrífugos:

VENTAJAS:

- Baja caída de presión.
- Área interna abierta para evitar obstrucciones.
- Flexibilidad en materiales de construcción.

DESVENTAJAS:

- Problemas en las boquillas.
- Baja eficiencia en partículas de tamaño sub-micrónico.

Mamparas:

VENTAJAS:

- Baja caída de presión.
- Simplicidad.
- Son compactos.

DESVENTAJAS:

- Baja eficiencia en colección de partículas.
- Baja eficiencia en absorción.
- No puede manejar cargas de polvo pesadas.

Lavadores de impacto y arrastre:

VENTAJAS:

- No necesita bombeo ni toberas.
- Maneja material fibroso.
- Tiene remoción de partícula y absorción simultánea.

DESVENTAJAS:

- Eficiencia de colección y absorción limitadas.
- Control del nivel del líquido difícil.
- El peso aumenta con el líquido.
- El diseño integral causa acceso difícil.
- Baja eficiencia de clarificación del líquido.

Mecánicos:

VENTAJAS:

- Requiere poco espacio.
- Bajo requerimiento de líquido.
- Insensible a fluctuaciones de volumen.

DESVENTAJAS:

- Requerimiento de mantenimiento.
- Baja eficiencia de absorción.
- Materiales de construcción limitados.

3.4 APLICACIONES DE LAVADORES.

Los procesos para los cuales se aplica cada tipo de lavador se enlistan en la tabla V al final de este capítulo [3].

A continuación se mencionan las aplicaciones para cada categoría:

Los lavadores con platos son aplicados más frecuentemente a procesos de secado, aunque también son elegidos para operaciones de combustión y fundición, y para la remoción de

contaminantes del gas.

Los lavadores de lecho empacado son prescritos casi exclusivamente para el tratamiento de gases contaminados y para coleccionar liquidos en neblinas. Tambien se utilizan para particulas solubles y para particulas insolubles, no adheribles.

Los lavadores de lecho fibroso, como torres empacadas, se escogen para capturar gases contaminados y liquidos en neblinas. Tambien se especifican para particulas solubles y, ocasionalmente, para particulas insolubles no adheribles.

Los lavadores de rocío preformado son utilizados principalmente para capturar gases. Tambien se emplean para unidades de fundición (cápsulas húmedas) y, ocasionalmente, para procesos de calcinación, combustión y secado, como tambien para la coleccion de liquidos en neblinas. Se utilizan para remover el SO_2 y particulas en plantas de alta energia, y para la coleccion de particulas en general.

Los lavadores de gas atomizador se utilizan con mayor frecuencia en operaciones de fundición. Tambien se utilizan en procesos de calcinación y secado, y ocasionalmente para la coleccion de contaminantes de gases y control en procesos de combustión. Se utilizan en plantas de alta energia para la remoción de SO_2 y particulas.

Los lavadores centrifugos están frecuentemente acoplados a secadores, y algunos están acoplados a trituradores. Los lavadores centrifugos son raramente seleccionados para el control de emisiones de unidades distintas a las

mencionadas. Las unidades centrifugas con manparas interiores se utilizan para aplicaciones metalúrgicas y para la colección de partículas con eficiencia moderada en procesos con rocas.

Los lavadores con manparas son los menos utilizados. La única aplicación descubierta fué para procesos de secado.

Los lavadores de impacto y arrastre han sido utilizados para procesos de calcinación, combustión y trituramiento y para la colección de contaminantes del gas. Los eyectores Venturi se utilizan en refinerías de petróleo para recuperar el catalizador en polvo.

Los lavadores con ayuda mecánica tienen pocas aplicaciones. Estos equipos se incluyen en procesos de secado y fundición, y en la remoción de contaminantes del gas.

Los lavadores de lecho movedido se utilizan más frecuentemente en procesos de secado. También para limpiar las emisiones en procesos de combustión y fundición, y para el control de polvos de trituradores y gases contaminantes. Se utilizan en plantas de alta energía para remover el SO_2 y partículas.

TABLA V
 APLICACIONES LAVADORES

Proceso	Tipo de Lavador									
	Platos	Empaque Masivo	Lecho Fibr.	Rocío Prefor.	Rocío Atom.	Centríf.	Mamparas	Arrastre Mecánico	Lecho Moved.	
Calcinación	6 (1)	2 (1)	- (0)	13 (5)	21 (23)	- (0)	- (0)	43 (3)	- (0)	- (0)
Combustión	17 (3)	- (0)	- (0)	5 (2)	2 (2)	2 (1)	- (0)	29 (2)	- (0)	9 (2)
Trituración	6 (1)	- (0)	- (0)	- (0)	- (0)	26 (11)	- (0)	14 (1)	- (0)	5 (1)
Secado	39 (7)	- (0)	- (0)	10 (4)	18 (19)	70 (30)	100 (1)	- (0)	25 (1)	64 (14)
Remoción de gas	17 (3)	72 (33)	40 (2)	45 (18)	9 (10)	2 (1)	- (0)	14 (1)	50 (2)	5 (1)
Recuperación nieblas liq.	0 (0)	24 (11)	60 (3)	7 (3)	- (0)	- (0)	- (0)	- (0)	- (0)	- (0)
Fundición	17 (3)	2 (1)	- (0)	20 (8)	50 (54)	- (0)	- (0)	- (0)	25 (1)	18 (4)

Notas:

1. Leer verticalmente. Ej: 39% de los lavadores de platos se usan en procesos de secado
2. Los números en paréntesis indican el número de operarios que reportaron información

CAPIULO 4

LAUDOR VENTURI

LAVADOR VENTURI

4.1 FUNCIONAMIENTO.

La característica principal de un lavador tipo Venturi es la presencia de una sección transversal reducida o "garganta" a través de la cual el gas es forzado a fluir a alta velocidad. el gas se acelera y pasa a través de la garganta donde entra en contacto con el líquido de lavado. El líquido se introduce con una velocidad axial muy baja y es acelerado junto con el gas. Esto provee la velocidad relativa que se necesita para que se efectúen los mecanismos de colección. Estos mecanismos son: impacto (el más importante), inercia, difusión, nucleación y condensación. La finalidad es lanzar la partícula a una velocidad relativamente alta y suficiente hacia un obstáculo que la atrape, este obstáculo generalmente es una gota de agua (fig. 27) [2].



Figura 27

En la garganta, las partículas suspendidas encuentran los

obstáculos líquidos y hacen impacto con éstos. Conforme el gas deja la garganta, trae consigo las gotas de líquido que han alcanzado velocidades cercanas a las del gas. La mezcla pierde velocidad conforme entra en la sección divergente del Venturi.

Las fuerzas de arrastre causan que algo de la energía cinética del líquido se transfiera a la corriente del gas, dando como resultado una recuperación parcial de la energía que se había perdido durante la aceleración del gas en la garganta. Esta energía es la que distingue a los lavadores Venturi de otros colectores.

Una vez que la mezcla se ha desacelerado lo suficiente para minimizar las pérdidas, se deben remover las gotas de líquido del resto de la corriente. Para lograr esto se utilizan separadores ciclónicos, los cuales pueden estar equipados con eliminadores de niebla para asegurar una remoción completa. En el separador ciclónico, las fuerzas centrífugas y de impacto separan el líquido de la corriente de gas [6].

4.2 ASPECTOS DE DISEÑO.

4.2.1. Eficiencia de colección de partículas:

El factor de mayor influencia en el diseño de un lavador Venturi es la caída de presión, la cual es función de la velocidad que tenga el gas en la garganta y del flujo del líquido de lavado.

Los lavadores de alta energía son operados con caídas de presión en exceso de 2.54 KPa (100 pulgadas columna de agua). La mayoría de los lavadores operan con una caída de presión comprendida en el rango de 0.508 a 1.27 KPa (20 a 50

pulgadas columna de agua). En cuanto a la relación líquido a gas, éstas varían de 0.00757 a 0.056 m³/28.32 m³ de gas (2 a 15 gal/1000 ft³) dependiendo de las características del polvo que se va a remover, del método de introducción del agua, de la temperatura de entrada del gas y de los sólidos presentes.

Si el método de introducción de agua es poco eficiente, se requiere mayor cantidad para lograr buenos resultados. Si la temperatura de entrada del gas es alta, una considerable cantidad del líquido de lavado será evaporada en el punto de contacto por lo que se debe aumentar el flujo de agua. Y, por último, si la carga de polvo es alta a la entrada del colector, la relación de líquido de lavado se aumenta para reducir la posibilidad de que el desagüe se tape.

4.2.2. Eficiencia de absorción:

Los lavadores Venturi están siendo utilizados para la absorción de contaminantes donde la escala potencial es alta con otro tipo de dispositivos. La transferencia de masa se lleva a cabo a través del área superficial formada por las gotas. Si la caída de presión es alta, se crean gotas más pequeñas y más turbulencia, incrementando la eficiencia. Sin embargo, el tiempo de contacto es relativamente bajo en los Venturis por lo que la eficiencia total es baja comparada con otros dispositivos.

Los Venturis pueden ser arreglados en serie para incrementar la eficiencia de colección.

4.2.3. Características de construcción:

El Área transversal del lavador Venturi puede ser circular o rectangular. La forma circular no se utiliza en tamaños

grandes (mayores de 0.3048 m de diámetro) debido a que es muy difícil obtener distribuciones de líquido uniformes alrededor de toda la sección. La forma rectangular es utilizada para diámetros grandes por tener un lado corto donde puede obtenerse una buena distribución.

Las gotas de líquido pueden formarse utilizando cualquiera de las dos técnicas siguientes. La más común es simplemente permitir que la alta velocidad del gas atomice el líquido. Este método requiere el suministro de energía de los ventiladores. El segundo método es atomizar el líquido bombeándolo a alta presión a través de orificios pequeños en boquillas atomizadoras. Este método está limitado a aplicaciones donde puede alimentarse líquido limpio. Sin embargo, se requieren grandes cantidades de líquido. La primera técnica provee un método simple para obtener una distribución de líquido apropiada que genere obstáculos de colección suficientes.

Los lavadores Venturi pueden diseñarse de dos maneras, ambas de fácil construcción: una de ellas es el diseño de una garganta fija la cual está diseñada para un flujo específico de gas. La otra es el diseño con garganta variable que puede ser ajustada a las condiciones de operación.

Ambos diseños presentan ciertas ventajas, dependiendo de la operación que se realice, por ejemplo, si el lavador es de garganta fija, resulta ser de costo muy bajo y requiere poco mantenimiento; si el lavador es de garganta variable, puede utilizarse en casos en los que existan grandes variaciones en el flujo del gas.

Se debe tener cuidado al determinar si se debe especificar o no un diseño de garganta variable. Por ejemplo, si el flujo de gas fluctúa dentro del intervalo de $\pm 20\%$ puede obtenerse la misma eficiencia de las condiciones de diseño

sin cambiar la caída de presión total o la relación líquido/gas en el lavador Venturi, esto se debe a que la baja velocidad en la garganta es compensada por la baja relación líquido/gas, por lo que los efectos netos indican que no hay diferencia en la operación.

Por el contrario, si existen grandes fluctuaciones del flujo de gas o este puede anticiparse debe utilizarse un Venturi con garganta variable, ya que esta puede ser ajustada para encontrar las condiciones exactas de operación en un tiempo dado, manteniendo la velocidad y la caída de presión constante sin disminución en la eficiencia de colección.

Esencialmente existen tres diseños para tener una garganta variable:

a) La cámara rectangular con paredes convergentes y platos móviles dentro de la cámara para ajustar la garganta. Los platos localizados en el interior de la cámara son espaciados para controlar la longitud de la garganta del Venturi. Los controles pueden ser operados fácilmente para mover los platos hacia sí mismos cambiando la longitud de la garganta mientras el ancho continúa sin cambio. El mecanismo de ajuste es manual (Fig. 28).



Figura 28

b) El tipo flotador, constituido por un cono central que reduce el área transversal de la garganta de manera uniforme, lo que elimina la posibilidad de interferir con la distribución de líquido en el gas. En principio, un actuador opera con la caída de presión a través del equipo y posiciona el eje que contiene el cono reductor. Conforme el flujo de gas baja, y la caída de presión tiende a decrecer, el eje posiciona al cono dentro de la garganta y aumenta la caída de presión (Fig. 29).

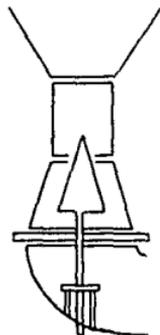


Figura 29

c) El tipo mampara tiene en esencia el mismo principio que el flotador. La mampara está montada en una flecha con cojinetes localizados en el exterior de la unidad para evitar el contacto con el líquido y el gas. Generalmente se coloca un sello simple para evitar fugas. El sistema actuador está conectado a la señal de caída de presión con lo que puede ajustarse automáticamente a las condiciones de operación. También puede tenerse un ajuste de tipo manual (fig. 30).

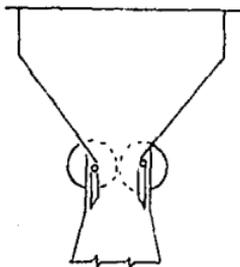


Figura 30

En los diseños tipo flotador y mampara puede utilizarse como sistema actuador aire, agua de proceso o algún fluido hidráulico.

Es importante recordar que si la variación de flujo no es muy grande, lo mejor es adquirir un equipo con garganta fija, con esto, se elimina la necesidad de comprar un actuador mecánico caro y también se reduce el costo total de operación.

La selección del material de construcción apropiado para un lavador depende de varios factores; los más importantes son: requerimientos de fuerza (potencia), temperatura, corrosión, potencial de formación de escamas y potencial de erosión.

- Requerimientos de potencia.

Los lavadores están sujetos a tensiones que no se encuentran en otros equipos de control de contaminación. Una de las más importantes es la gran presión negativa que se desarrolla en las instalaciones de alta energía. Es muy usual encontrar diferencias de presión de 2.54 KPa (100 pulgadas columna de agua) a través de la cubierta. Esta presión puede fluctuar repentinamente debido a ajustes de

reguladores o problemas de ventilación. Por esto, el drenaje principal y el de emergencia pueden bloquearse, con lo que el lavador se llenaría de agua por lo menos hasta la altura del ducto de entrada, y si este tubo es vertical, el lavador se llenaría aún más. Los lavadores son colocados al aire libre por lo que también están sujetos a fuerzas naturales como viento y nieve.

- Temperatura.

Los lavadores saturan virtualmente todos los gases en el proceso de lavado. Estos gases a veces son enfriados desde 3905 a 611 K (2000° a 170° F) o menos. Así, como se utiliza una cantidad considerable de agua en el lavado, la coraza interna debe estar protegida por medio de una capa de agua. La sección de entrada del lavador no tiene este beneficio, lo que ocasiona un gran problema de temperatura. Existe siempre el riesgo de la falta de agua y la falla de sensibilidad de temperatura y dispositivos de protección para periodos pequeños durante la vida del equipo.

- Corrosión.

La corrosión es generalmente definida como la destrucción electroquímica de materiales metálicos por reacción con su ambiente.

Si la corrosión procede uniformemente sobre la superficie metálica, el ataque se clasifica como GENERAL o corrosión uniforme, esta se expresa como pulgadas de penetración por año o millas por año. Este tipo de corrosión puede predecirse por lo que puede usarse en diseño de equipo obteniéndola de cartas de corrosión o pruebas de laboratorio.

Como en todos los tipos de corrosión, muchos factores influyen en la relación de ataque. Tales factores son: acidez, cambios de temperatura, concentración, movimiento relativo a la superficie metálica, grado de poder de

oxidación y aereación, y la presencia o ausencia de inhibidores o aceleradores, entre muchos.

Esta corrosión puede clasificarse como:

- Excelente, con una relación menor a 5 millas por año. Los metales en esta categoría son recomendables para partes críticas (garganta).
- Satisfactoria, con relaciones que van de 5 a 50 millas por año. Los metales de esta categoría se utilizan para partes no críticas.
- Insatisfactoria, con relaciones mayores a 50 millas por año.

Otros tipos de corrosión que puede sufrir un lavador son: grietas, hoyos, intergranular, fatiga, tensión, etc. [11].

4.2.4. Características de mantenimiento:

Las velocidades recomendadas en la literatura que debe tener el flujo al pasar a través de la garganta del Venturi, varían entre 60 y 120 m/s (200 y 400 ft/s). A estas velocidades, la relación de desgaste es alta en la sección de la garganta por lo que se deben utilizar materiales de construcción que sean resistentes a la abrasión.

Las gargantas de los lavadores Venturi usualmente están revestidas con ladrillos de carburo de silicio para alargar la vida de la misma. Otra medida que previene el deterioro de la sección de la garganta es el reemplazar los recubrimientos gastados. El mayor desgaste ocurre generalmente en áreas bajo la zona de aceleración.

La distancia desde la garganta hasta donde existe el mayor desgaste está relacionada con el diámetro de la garganta. En lavadores Venturi más largos la erosión existe a una distancia más lejana después de la garganta.

La abrasión puede reducirse si se remueven las partículas largas antes de acelerar el gas. Los lavadores con mamparas pueden servir para esta función mientras humidifican también el gas; puede colocarse un orificio y suministrar por él 0.00378 o 0.0075 m³/ 28.32 m³ de gas (1 o 2 gal/1000 ft³) y operar a 0.0508 KPa (2 pulgadas columna de agua) para realizar esta función.

Corriente abajo de la garganta, la abrasión se reduce por medio de un codo inundado. La corriente de gas se impacta en una reserva de líquido con lo que se ocasiona una reducción efectiva de la velocidad sin ocasionar la abrasión de la cubierta.

4.3 APLICACIONES.

La aplicación principal del lavador Venturi es la remoción de partículas finas de corrientes de aire o gas, pero este lavador puede utilizarse para la absorción de gases y colección de partículas simultáneamente.

Otras aplicaciones típicas de estos lavadores incluyen el control de emisiones de incineradores, hornos, calcinadores y secadores.

La tabla VI, que se presenta a continuación, contiene las aplicaciones más comunes de los lavadores Venturi [10].

PROCESO	APLICACION
Calentamiento Industrial Plantas de Carbón	Los lavadores Venturi se utilizan para remover las cenizas y SO ₂ del aire.

TABLA VI (continuación)

Madera y Corteza	Venturis con 7-15 pulgadas columna de agua se utilizan en molinos de pulpa.
Bagazo	Se utilizan para la remoción de partículas.
Minas de Hierro	Se utilizan en la trituración secundaria fina, donde se requieren caídas de presión de 20 pulgadas.
Minas de Cobre	Se utilizan para hornos y calcinadores.
Minas de Carbón	Venturis con 8-35 pulgadas columna de agua se utilizan para los efluentes de los secadores de carbón.
Molinos de Pulpa	Se utilizan en las calderas de recuperación de licor negro y caleras.
Química en general	Su uso es muy extenso en secadores de rocío, hornos e incineradores.
Plantas de Acido Sulfúrico	Se utilizan para remover las neblinas de ácido.
Plantas de Acido Fosfórico	Se utilizan para remover las neblinas de ácido.
Compuestos de Caucho.	Agotamiento de mezcladores.
Asfalto	Se utilizan Venturis donde antes se usaron torres de rocío.

TABLA VI (continuación)

Chimeneas abiertas	Se utilizan con mucha frecuencia.
Hornos básicos de oxígeno	Se utilizan Venturis o precipitadores.
Máquinas de Toba	Se utilizan Venturis.
Hornos Eléctricos	Se utilizan Venturis y colectores de bolsas.
Aleaciones de Hierro	Se utilizan Venturis con alta caída de presión.
Limpieza de Fundiciones	Algunas cámaras de secado automáticas requieren la eficiencia de un Venturi.
Hornos de Fundición	El lavador Venturi es muy utilizado para este tipo de aplicación.
Cloración de Aluminio	Cloruros y óxidos son removidos con una caída de presión de 30-50 pulgadas columna de agua.
Calentadores de Carbón	Los lavadores Venturi se utilizan en gran cantidad para la absorción y la colección de partículas.
Incineradores	Se utilizan Venturis y Precipitadores.
Lodos y aguas residuales	Se utilizan para la remoción de las partículas arrastradas.

CHAPTER 5

EXPERIMENTATION

EXPERIMENTACION

En este capítulo se realizará lo siguiente:

- 5.1 Muestreo.
- 5.2 Determinación de la capacidad de la fuente de succión.
- 5.3 Dimensionamiento del lavador.
- 5.4 Construcción.
- 5.5 Parte experimental.

El objetivo de realizar esta experimentación es determinar la influencia de diferentes variables que afectan la eficiencia de un lavador tipo Venturi, así como observar físicamente el fenómeno de lavado. Las variables que se tratarán en esta experimentación son la relación líquido/gas y la cantidad de material particulado presente en la corriente de gas.

Para determinar las condiciones óptimas de operación de un lavador de gases deben realizarse pruebas en plantas piloto. Este tipo de plantas tienen capacidades que van desde 1/10 de la capacidad de la planta real hasta $0.00047 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1 \text{ ft}^3/\text{min}$) de muestra; la capacidad depende del objetivo de la instalación de esta planta. Por ejemplo, si el objetivo es conocer las características de mantenimiento y seguridad necesarias para la operación, lo más conveniente es instalar una planta de 1/10 de la capacidad requerida real. Por otra parte, si el objetivo es conocer solo las condiciones de operación, como en este caso, cualquier tamaño de planta es recomendable.

5.1 MUESTREO.

En el capítulo 2 se mencionó que la obtención de muestras representativas de los gases y partículas que fluyen a través de un ducto o chimenea requiere la utilización de un tren de muestreo. El objetivo principal del muestreo de gases o partículas es estimar su concentración en el aire; sin embargo, puede integrarse, en el tren de muestreo, un mini-lavador que sea fácilmente transportable, que utilice tubería común y produzca resultados en un tiempo corto de trabajo. Este lavador toma en cuenta la influencia de las variables de proceso (tales como la caída de presión y la relación líquido/gas) en la eficiencia de colección, la que puede estudiarse cambiando las condiciones de operación del lavador.

5.2 DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE LA FUENTE DE SUCCION.

La capacidad del lavador Venturi que se diseñó para la parte experimental, se fijó de acuerdo a la capacidad de la fuente de succión utilizada en un tren de muestreo, la cual se determinó utilizando un gasómetro seco, un manómetro en U de agua y una válvula, como se muestra en la figura 31:

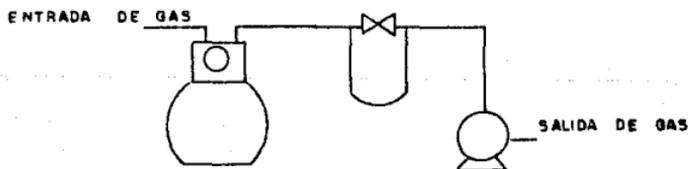


Figura 31

Se determinó el flujo de aire que maneja la fuente de succión en un minuto. Los datos obtenidos del gasómetro se presentan en la tabla VII.

TABLA VII

GASOMETRO		
t (min)	m ³ inicial	m ³ final
1	0.967	1.187

Por lo que el flujo de gas (G) que se manejará es el siguiente:

$$G = (1.187 - 0.967) \text{ (m}^3\text{)} / 1 \text{ [min]} = 0.22 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$= 7.3013 \text{ ft}^3\text{/min}$$

Este flujo fue constante en todas las determinaciones hechas.

La caída de presión máxima de la fuente de succión, la cual se obtuvo impidiendo el flujo de gas (cerrando totalmente la válvula), fue de 16 pulgadas columna de agua.

Dado que la caída de presión representa la energía disponible para realizar el lavado, esta debe repartirse entre las diferentes partes del sistema. Basándonos en la experiencia de constructores de lavadores (S.P.E.C.C.S.A.), se dividió la caída de presión de la siguiente manera:

- a) Tubo Venturi = 14 pulgadas columna de agua.
- b) Separador ciclónico = 2 pulgadas columna de agua.

5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL LAVADOR.

El diseño del lavador se divide en dos partes:

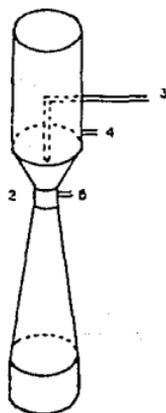
5.3.1 Diseño del tubo Venturi.

5.3.2 Diseño del separador ciclónico.

5.3.1 DISEÑO DEL TUBO VENTURI

El diseño del tubo Venturi (fig. 32) comprende dos etapas:

- a) Secciones geométricas.
- b) Introducción y aceleración del líquido.



1. TUBO VENTURI
2. GARGANTA
3. BOQUILLA
4. TOMA DE PRESION
5. TOMA DE PRESION

Figura 32

a) Secciones geométricas.

Aplicando los balances de materia y energía a la operación de un tubo Venturi, puede determinarse su ecuación de diseño con la que puede obtenerse el diámetro de la garganta.

$$V_b = \frac{C_v Y}{\sqrt{1 - (D_b/D_a)^4}} \sqrt{\frac{2 g_c (P_a - P_b)}{\rho}} \quad (1)$$

Donde:

D_a = Diámetro de la tubería (ft)

D_b = Diámetro de la garganta del tubo Venturi (ft)

V_b = Velocidad en la garganta (ft/seg)

ΔP = Caída de presión entre la entrada de la sección convergente y la garganta (lb/ft²)

ρ = Densidad del fluido (lb/ft³);

g_c = Factor de proporcionalidad = 32.174 ft lb/lbf s²

C_v = Coeficiente del Venturi

Y = Factor de corrección para fluidos compresibles.

G = Flujo de gas através del tubo (ft³/seg)

A_b = Área transversal de la garganta del tubo Venturi (ft²)

$$\text{Si } V_b = G/A_b$$

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$\frac{G}{A_b} = \frac{C_v Y}{\sqrt{1 - (D_b/D_a)^4}} \sqrt{\frac{2 g_c \Delta P}{\rho}}$$

$$A_b = (\pi/4) D_b^2$$

$$\frac{D_b^2}{\sqrt{1 - (D_b/D_a)^4}} = \frac{4 G}{\pi C_v Y \sqrt{\frac{2 g_c \Delta P}{\rho}}}$$

Elevando al cuadrado:

$$\frac{D_b^4}{1 - (D_b/D_a)^4} = \left[\frac{4 G}{\pi C_v Y \sqrt{\frac{2 g_c \Delta P}{\rho}}} \right]^2 = K$$

$$D_b^4 = [1 - (D_b/D_a)^4] K$$

$$D_b^4 = K - K(D_b/D_a)^4$$

$$D_b^4 + K/D_a^4 (D_b^4) = K$$

$$D_b = \left(\frac{K}{1 + K/D_a^4} \right)^{1/4}$$

Para el diseño del tubo se tienen los siguientes valores:

$D_a = 1.5$ in, debido a que la tubería de conexión con la fuente de succión tiene este diámetro.

$\Delta P = 14$ in H_2O

$Q = 7.3913$ ft³/min

$C_v = 0.98$
 $Y = 0.97$ > valores recomendados para el diseño (12)

$\rho = 0.1515$ lb/ft³, valor reportado para aire a 20 °C (13)

Sustituyendo los valores anteriores obtenemos los siguientes resultados:

$K = 1.69125 \exp -6$

$D_b = 0.036$ ft = 0.44 in (0.5 in)

El resto de las secciones geométricas se calcularon utilizando las siguientes dimensiones recomendadas en la literatura (14):

Angulo de convergencia: $\alpha_1 = 21$ a 25°

Angulo de divergencia: $\alpha_2 = 5$ a 15°

Largo de garganta = diámetro de garganta

La razón por la que el ángulo de divergencia es menor al de convergencia es porque en esta sección se lleva a cabo la aceleración de las gotas de líquido. Mientras mas larga sea de mejores resultados.

Las dimensiones finales del levador son:

Diámetro de garganta = 0.5 in = 12.7 mm

Diámetro de tubo = 1.5 in = 38 mm

Largo de garganta = 0.5 in = 12.7 mm

$\alpha_1 = 25^\circ$ $L_c = 0.5/\tan 25 = 1.072$ in = 25.4 mm

$\alpha_2 = 7^\circ$ $L_d = 0.5/\tan 7 = 4.072$ in = 101.6 mm

Donde L_c = largo de la sección convergente, y L_d = largo de la sección divergente.

b) Introducción y aceleración del líquido.

Debido a que el tubo Venturi diseñado es muy pequeño (menor de 1 ft de diámetro) su geometría será circular. Para facilitar su construcción, el agua se introducirá por medio de una boquilla dirigida hacia el centro de la garganta favoreciendo así una buena distribución del líquido. El líquido se atomizará debido a la velocidad del gas en el Venturi.

El diámetro de la boquilla se determinó a partir de la relación líquido/gas y la velocidad del líquido, de la siguiente manera:

Para la relación líquido/gas de 8 gpm/1000 cfm, el flujo de líquido (L) es:

$$L = (8 \text{ (gal/min)}/1000 \text{ (ft}^3\text{/min)})(7.3013 \text{ (ft}^3\text{/min)}) \\ = 0.05841 \text{ gal/min} = 7.8083 \times 10^{-8} \text{ ft}^3\text{/min}$$

El área de la boquilla está dada por la ecuación:

$$L = A \cdot V_1$$

$$A = L/V_1$$

donde A = área de la boquilla (ft²), L = flujo de líquido (ft³/min) y V₁ = velocidad del líquido (ft/min).

Utilizando la velocidad de líquido recomendada [13] de 400 - 420 ft/min se tiene que:

$$A = (7.8083 \times 10^{-8} \text{ ft}^3\text{/min})/410 \text{ ft/min} = 1.904 \times 10^{-10} \text{ ft}^2$$

Calculando el diámetro:

$$D = (4A/\pi)^{1/2} = 4.9242 \times 10^{-5} \text{ ft (1.5 mm)}$$

5.3.2 DISEÑO DEL SEPARADOR CICLÓNICO.

En el separador ciclónico (fig. 33) el gas tratado entra tangencialmente después de dejar la garganta haciendo un giro de 90° y elimina la mayor parte del licor (líquido de lavado y material particulado).



Figura 33

La relación de velocidades que se tiene entre la garganta del Venturi (V_b) y el separador (V_s) es $V_b/V_s = 60$, y la relación L/D (longitud/diámetro) recomendada para el separador es de 2.5 [13]. Por lo tanto, las dimensiones del separador ciclónico se obtuvieron de la siguiente manera:

$$A = \pi r^2 = 1.2667 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 1.3635 \times 10^{-8} \text{ ft}^2$$

$$\text{Si } Q = 0.003445 \text{ m}^3/\text{s} = 7.3013 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$V_b = Q/A = 27.1966 \text{ m/s} = 5354.82 \text{ ft/min}$$

$$\text{Si } V_b/V_s = 60$$

$$V_s = V_b/60 = 0.4532 \text{ m/s} = 89.247 \text{ ft/min}$$

$$A_s = Q/V_s = 0.0076 \text{ m}^2 = 0.08181 \text{ ft}^2$$

$$D = (4A/\pi)^{1/2} = 0.09837 \text{ m} = 0.3227 \text{ ft} = 3.87 \text{ in (4 in)}$$

Si:

$$L/D = 2.5$$

$$L = 2.5 D = 10 \text{ in}$$

5.4 CONSTRUCCION.

El lavador Venturi calculado puede construirse en distintos materiales, pero en nuestro caso se construyó de vidrio con el fin de observar su funcionamiento así como por facilidad de su construcción.

El separador ciclónico y demás partes de tubería se construyeron de PVC ya que sus dimensiones corresponden a las de tubería comercial, facilitando de esta manera su construcción (fig. 34).

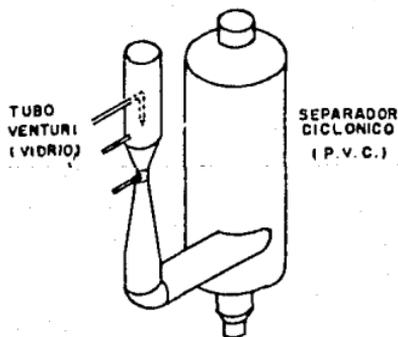


Figura 34

5.5 PARTE EXPERIMENTAL.

El factor de mayor influencia en la eficiencia de un lavador Venturi es la caída de presión, la cual depende de la relación líquido/gas que se utilice y del diámetro de la garganta. La relación líquido/gas es de fácil control por lo que en la parte experimental se realizarán pruebas para determinar la relación con la que se obtenga la mejor eficiencia para una concentración de partículas dada. Esto se realizará para varios tipos de material particulado con el fin de observar la variación de la eficiencia con el tamaño de partícula.

El Venturi que se construyó es de garganta fija por lo que esta variable no puede utilizarse para cambiar la caída de presión.

La experimentación consiste en analizar como la relación líquido/gas y la concentración de material particulado influyen en la eficiencia de colección del lavador.

Una vez que se haya obtenido la relación L/G más eficiente, se verificará si es apropiada para otras concentraciones de polvo.

5.5.1 MATERIAL PARTICULADO.

El material particulado que se utilizará es: arena, polvo y ceniza. La concentración variará de 22.88 g/m^3 hasta 228.8 g/m^3 ($10 \text{ gr/ft}^3 - 100 \text{ gr/ft}^3$). Las relaciones líquido/gas serán de 0.0057 a $0.053 \text{ m}^3/28.32 \text{ m}^3$ de gas, (2 a $14 \text{ gpm}/1000 \text{ cfm}$) [10].

5.5.2 PROCEDIMIENTO.

El procedimiento para realizar la experimentación es:

- Montar el equipo (fig. 35)
- Fijar el flujo de líquido.
- Pesar la muestra de material particulado.
- Encender la fuente de succión.
- Introducir el polvo en el equipo.
- Medir la caída de presión.
- Recuperar los lodos obtenidos.
- Filtrar, secar y pesar el material colectado.
- Recopilar los datos obtenidos.

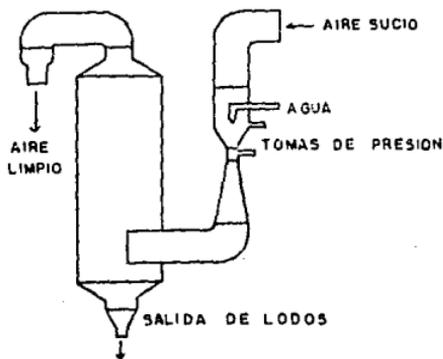


Figura 35

Se verificará si el lavador construido cumple con la reglamentación correspondiente a la emisión de material particulado vigente en la Ciudad de México.

5.5.3 EFICIENCIA DEL LAVADOR.

La emisión permitida (E_p), de acuerdo a la norma NTE-CCAT-009/88, es de 1.21 g/min para el flujo de gas que se manejará; la eficiencia que requiere el lavador (E_r), para las distintas concentraciones de material particulado, se calcula a partir de:

$$E_r = (100)(C_p - E_p)/C_p$$

Donde: E_r = eficiencia requerida. C_p = Concentración de partículas, E_p = emisión permitida.

La eficiencia requerida, de acuerdo a diferentes concentraciones de partículas, se presenta en la tabla VIII.

TABLA VIII

CONCENTRACION DE PARTICULAS (C_p)		EFICIENCIA REQUERIDA % (E_r)
gr/min	g/min	
10	4.73	74.41
20	9.46	87.20
30	14.19	91.47
40	18.92	93.60
50	23.65	94.88
60	28.38	95.73
70	33.11	96.34
80	37.84	96.80
90	42.58	97.15
100	47.31	97.44

5.5.4 PRIMERA PARTE: Influencia de la relación líquido/gas.

Para todas las relaciones L/G se manejó una concentración (C_p) de 45.76 g/m^3 (20 gr/ft^3) debido a que es un valor comunmente utilizado en estos lavadores. El flujo de gas de la fuente de succión es de $7.3013 \text{ ft}^3/\text{min}$; con este flujo, la muestra de material particulado (M_p) fue de:

$$M_p = (20 \text{ gr/ft}^3) (1 \text{ lb}/7000 \text{ gr}) (7.3013 \text{ ft}^3/\text{min}) (453.6 \text{ g/lb})$$

$$= 9.46 \text{ g/min}$$

Los datos experimentales son la caída de presión en el Venturi (ΔP) y el peso del material particulado eliminado del aire (M_o) para los diferentes materiales utilizados. Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla IX.

Arena.

L/G (gal/1000cfm)	CAIDA DE PRESION (inH ₂ O)/'				PESO DE MUESTRA (gramos) No			
	CORRIDA			media	CORRIDA			media
	1	2	3		1	2	3	
2	12.4	12.4	12.4	12.40	8.7	8.9	8.9	8.83
4	12.7	12.6	12.6	12.63	8.9	8.9	9.1	8.97
6	12.9	12.8	12.8	12.83	8.9	9.0	9.1	9.00
8	12.9	12.9	12.9	12.90	9.1	9.2	9.2	9.17
10	12.9	12.9	12.9	12.90	9.2	9.1	9.2	9.17
12	13.0	13.0	13.0	13.00	9.2	9.1	9.3	9.20
14	13.0	13.0	13.0	13.00	9.2	9.0	9.2	9.13

Tabla X.

Polvo.

L/G (gal/1000ft ³)	CAIDA DE PRESION (inH ₂ O)/'				PESO DE MUESTRA (gramos) No			
	CORRIDA			media	CORRIDA			media
	1	2	3		1	2	3	
2	12.4	12.4	12.6	12.47	8.9	9.1	9.2	9.07
4	12.8	12.6	12.6	12.67	9.1	9.1	9.0	9.07
6	12.8	12.8	12.8	12.80	9.1	9.1	9.1	9.10
8	12.9	12.9	12.9	12.90	9.2	9.2	9.1	9.17
10	12.9	12.9	12.9	12.90	9.2	9.2	9.15	9.18
12	13.0	13.0	13.0	13.00	9.15	9.2	9.3	9.22
14	13.0	13.0	13.0	13.00	9.3	9.3	9.2	9.27

TABLA XI.

Ceniza.

L/G (gal/1000ft ³)	CAIDA DE PRESION (inH ₂ O) ΔP				PESO DE MUESTRA (gramos) Mo			
	CORRIDA			media	CORRIDA			media
	1	2	3		1	2	3	
2	12.6	12.6	12.6	12.60	7.9	7.6	7.7	7.78
4	12.9	12.9	12.9	12.90	7.7	8.1	7.7	7.83
6	13.0	13.0	13.0	13.00	8.5	8.1	8.2	8.27
8	13.1	13.0	13.0	13.07	8.7	8.7	8.6	8.67
10	13.0	13.1	13.1	13.07	8.9	8.6	8.9	8.77
12	13.2	13.2	13.2	13.20	8.8	8.7	8.9	8.80
14	13.2	13.2	13.2	13.25	8.9	8.7	9.1	8.90

CALCULO DE LA EFICIENCIA:

A partir de estos datos se calculó la eficiencia de colección obtenida (Eo) con la siguiente ecuación:

$$Eo (\%) = 100 \cdot Mo/Mp$$

La eficiencia requerida, para todos los casos, es de 87.13 % de acuerdo a la norma NTE-CCAT-009/88.

Se calculó también la relación entre la eficiencia obtenida y la eficiencia requerida (Eo/Er). Estos datos se muestran en las siguientes tablas:

TABLA XII.

Arena.

L/G (gal/1000ft ³)	CAIDA DE PRESION. ΔP (inH ₂ O)	EFICIENCIA OBTENIDA E_o (%)	EFICIENCIA REQUERIDA E_r (%)	RELACION DE EFICIENCIAS
2	12.00	92.97	87.13	1.0796
4	12.63	95.39	87.13	1.0948
6	12.82	95.76	87.13	1.0969
8	12.90	97.52	87.13	1.1193
10	12.90	97.52	87.13	1.1193
12	13.00	97.87	87.13	1.1233
14	13.00	97.16	87.13	1.1152

TABLA XIII.

Polvo.

L/G (gal/1000ft ³)	CAIDA DE PRESION. ΔP (inH ₂ O)	EFICIENCIA OBTENIDA E_o (%)	EFICIENCIA REQUERIDA E_r (%)	RELACION DE EFICIENCIAS
2	12.67	96.43	87.13	1.1076
4	12.67	96.43	87.13	1.1076
6	12.90	96.81	87.13	1.1111
8	12.90	97.52	87.13	1.1193
10	12.90	97.70	87.13	1.1213
12	13.00	98.03	87.13	1.1234
14	13.00	98.96	87.13	1.1315

TABLA XIV.

Ceniza.

L/G (gal/1000ft ³)	CAIDA DE PRESION. ΔP (inH ₂ O)	EFICIENCIA OBTENIDA E_o (%)	EFICIENCIA REQUERIDA E_r (%)	RELACION DE EFICIENCIAS
2	12.60	81.91	87.13	0.9402
4	12.90	83.53	87.13	0.9593
6	13.00	87.94	87.13	1.0094
8	13.07	91.20	87.13	1.0582
10	13.07	93.26	87.13	1.0704
12	13.20	93.61	87.13	1.0745
14	13.20	94.60	87.13	1.0867

En base a las observaciones experimentales del funcionamiento del lavador y de los datos obtenidos, se encontró que las relaciones de 2, 4, y 6 gpm/1000 cfm, aunque cumplen con la eficiencia requerida, no son adecuadas ya que el flujo de liquido no es suficiente y provoca retención de partículas en las diferentes partes del lavador (especialmente en la sección divergente del venturi y el codo de unión con el separador). La relación L/G de 8 gpm/1000 cfm cumple con la eficiencia requerida y limpia completamente el lavador. Las relaciones liquido/gas mayores que esta no presentan ningún beneficio adicional, por el contrario implican un gasto innecesario de agua que en ocasiones provoca que el separador no sea adecuado y exista arrastre de liquido. En base a esto se determinó que la relación liquido/gas óptima es la de 8 gpm/1000 cfm de gas.

5.5.5.SEGUNDA PARTE: Influencia de la concentración de material particulado.

Utilizando la relación L/G determinada en el paso anterior (8 gpm/1000 cfm), se variará la concentración de arena en el intervalo mencionado en la tabla VIII. Se utilizó arena por facilidad de manejo y por su mayor disponibilidad.

Al igual que en la primera parte, se obtuvieron datos de caída de presión (ΔP) y peso de material particulado eliminado del aire como se muestra en la tabla XV.

TABLA XV.
Arena.

Concentración (gr/ft ³)	CAIDA DE PRESION (inH ₂ O) F				PESO DE MUESTRA (GRAMOS) No			
	CORRIDA			media	CORRIDA			media
	1	2	3		1	2	3	
20	12.6	12.6	12.6	12.60	9.1	9.3	9.2	9.17
40	12.7	12.7	12.7	12.70	10.3	10.6	10.5	10.50
60	12.8	12.8	12.8	12.80	27.5	27.7	27.9	27.50
80	12.9	12.9	12.9	12.90	37.1	37.2	37.2	37.20
100	13.0	13.0	13.0	13.00	47.0	46.6	47.0	46.87

Utilizando estos datos se puede encontrar la eficiencia de colección obtenida para cada caso. La eficiencia requerida cambia de acuerdo a la concentración de material particulado. La tabla XVI muestra estos calculos.

TABLA XVI.

Arena.

CONCENTRACION (gr/lit ³)	CAIDA DE PRESION. ΔP (inH ₂ O)	EFICIENCIA OBTENIDA E _o (%)	EFICIENCIA REQUERIDA E _r (%)	RELACION DE EFICIENCIAS
20	12.60	97.52	87.13	1.1193
40	12.70	97.78	93.60	1.0446
60	12.80	96.90	95.74	1.0121
80	12.90	98.31	96.00	1.0156
100	13.00	99.06	97.44	1.0164

De la observación de esta parte encontramos que si el problema que se está tratando tiene muy alta concentración, es preferible tratar o prelavado la corriente de gas sucio con otro dispositivo con el fin de eliminar las partículas más gruesas y disminuir así la concentración de polvo de la corriente que entre al lavador de gases.

CAPITULO 6

ANALISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 INFLUENCIA DE LA RELACION LIQUIDO/GAS.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la variable que más afecta la eficiencia de un lavador es la caída de presión. Esta pudo variarse cambiando la relación L/G en el lavador. Al trazar la curva de caída de presión vs relación L/G (Gráfica 1) se observa que la caída de presión aumenta al aumentar la relación L/G. En la misma gráfica, puede observarse que el aumento en la caída de presión es más pronunciado para valores L/G menores a 8 gpm/1000 cfm y que para valores mayores dicho aumento es menos pronunciado y tiende a ser constante después de los 12 gpm/cfm.

También se determinó cómo el tamaño de partícula afecta la caída de presión ya que para las partículas más finas (ceniza), el aumento es mayor en todo el intervalo de relaciones L/G comparado con el de las partículas gruesas (arena y polvo). La caída de presión no tiene una gran variación, pues siempre se encontró entre 12.4 y 13.2 pulgadas columna de agua.

En la gráfica 2, se trazó la curva que muestra el comportamiento de la eficiencia con la variación de la relación L/G, es decir, la influencia directa que esta variable tiene sobre la eficiencia. Se observa que la eficiencia requerida para obtener la emisión máxima permisible, dada por la legislación mexicana, se alcanza para todas las relaciones L/G recomendadas al utilizar partículas gruesas. Sin embargo, para las partículas finas, esto no se cumple sino hasta que se tiene una relación de 6 gpm/1000 cfm.

Puede observarse que la relación L/G de 8 gpm/1000 cfm (escogida como la óptima), cumple con la eficiencia requerida para todas las partículas y la eficiencia después de este punto no cambia notablemente, con lo que se confirma la decisión de considerarla óptima.

Para determinar la influencia de la caída de presión en la eficiencia de colección (determinación indirecta ya que como se mencionó anteriormente, la variable que origina esta ΔP es la relación L/G), se trazaron las curvas de eficiencia vs caída de presión para los distintos materiales particulados (gráficas 3,4,5), en las que se observa que la eficiencia aumenta al aumentar la caída de presión para una concentración de material particulado constante. Las curvas muestran que la eficiencia es menor y casi constante para ΔP bajas y muy grande para ΔP mayores (esta observación es relativa ya que, como se mencionó, tanto la eficiencia como la ΔP se encuentran en un intervalo pequeño).

6.2 INFLUENCIA DE LA CONCENTRACION DE MATERIAL PARTICULADO.

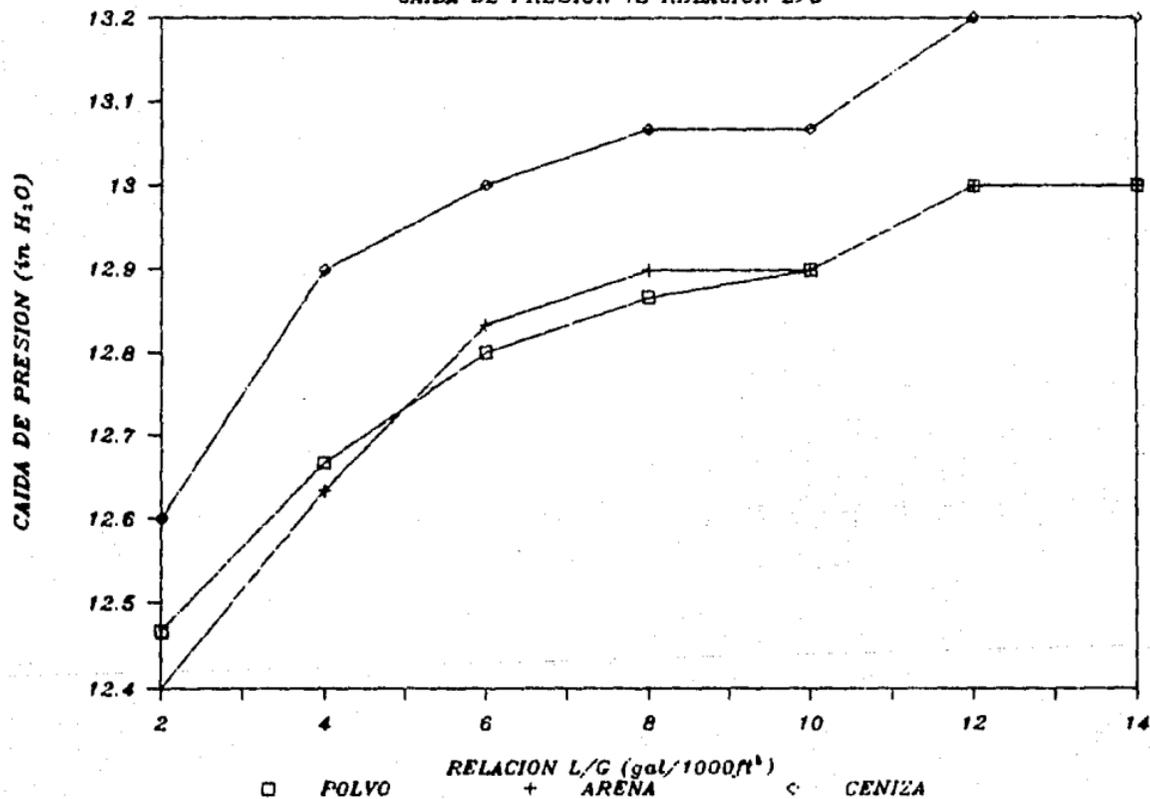
Con la relación L/G escogida (8 gpm/1000 cfm), se obtienen eficiencias mayores a la requerida para todas las concentraciones de arena utilizadas, comprobando así que la relación escogida es la óptima. Al trazar la curva de eficiencia vs concentración de arena (Gráfica 6), se observa que al ir aumentando la concentración, la eficiencia requerida y la eficiencia obtenida se van acercando cada vez más por lo que se puede pensar que lleguen a ser iguales en algún punto, lo que indicaría que se necesitaría otra relación L/G con la que se pudiera aumentar la caída de presión, o bien, instalar un prelavador con el fin de disminuir la concentración de partículas en el gas tratado.

La eficiencia obtenida es casi igual para todas las concentraciones lo que indica que para cualquier caso de contaminación por partículas, un lavador venturi ofrece la misma eficiencia de colección.

Durante la experimentación se observó que la concentración de material particulado tenía también cierta influencia en la caída de presión, por lo que se decidió trazar la curva de caída de presión vs. concentración de arena (Gráfica 7), en la que se observa que el aumento es proporcional al aumento de la concentración de arena. Sin embargo, este aumento solo es de 0.4 pulgadas columna de agua durante todo el proceso, por lo que no es un factor decisivo en la eficiencia de colección.

GRAFICA 1

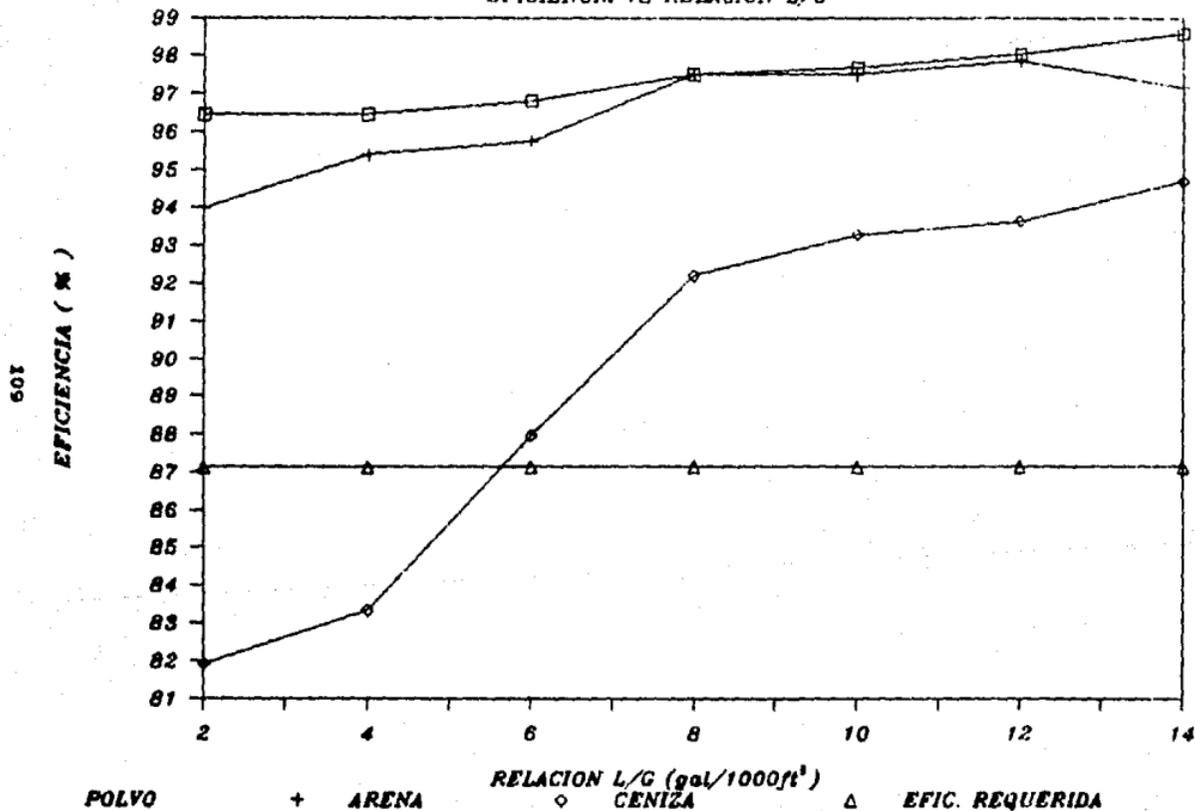
CAIDA DE PRESION VS RELACION L/G



801

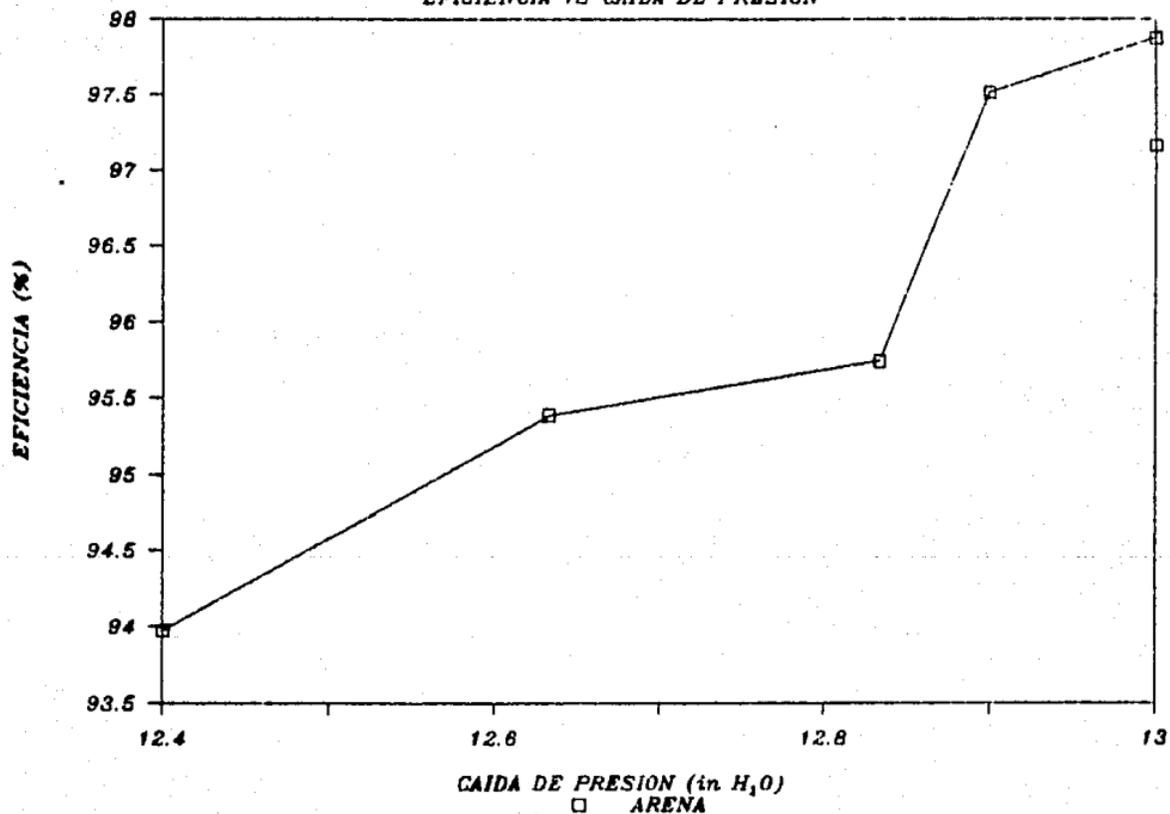
GRAFICA 2

EFICIENCIA VS RELACION L/G



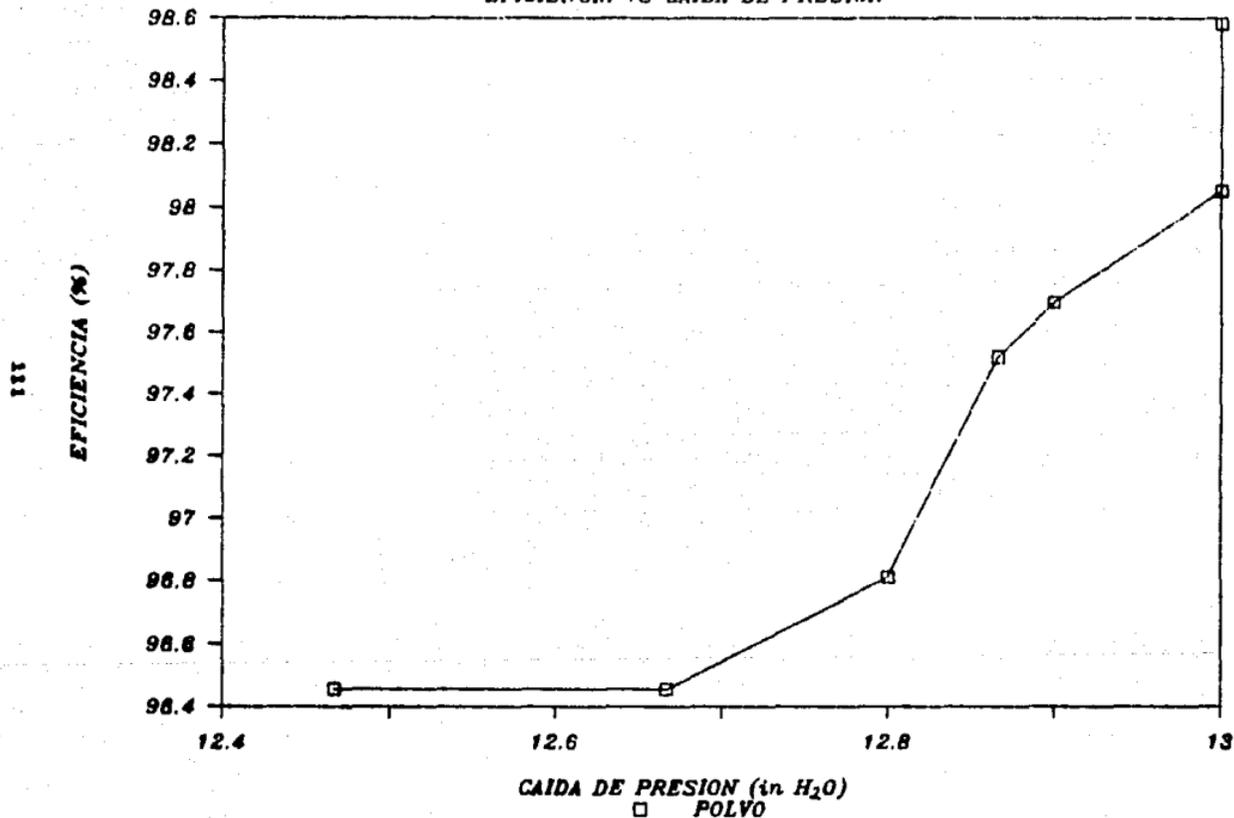
GRAFICA 3

EFICIENCIA VS CAIDA DE PRESION



GRAFICA 4

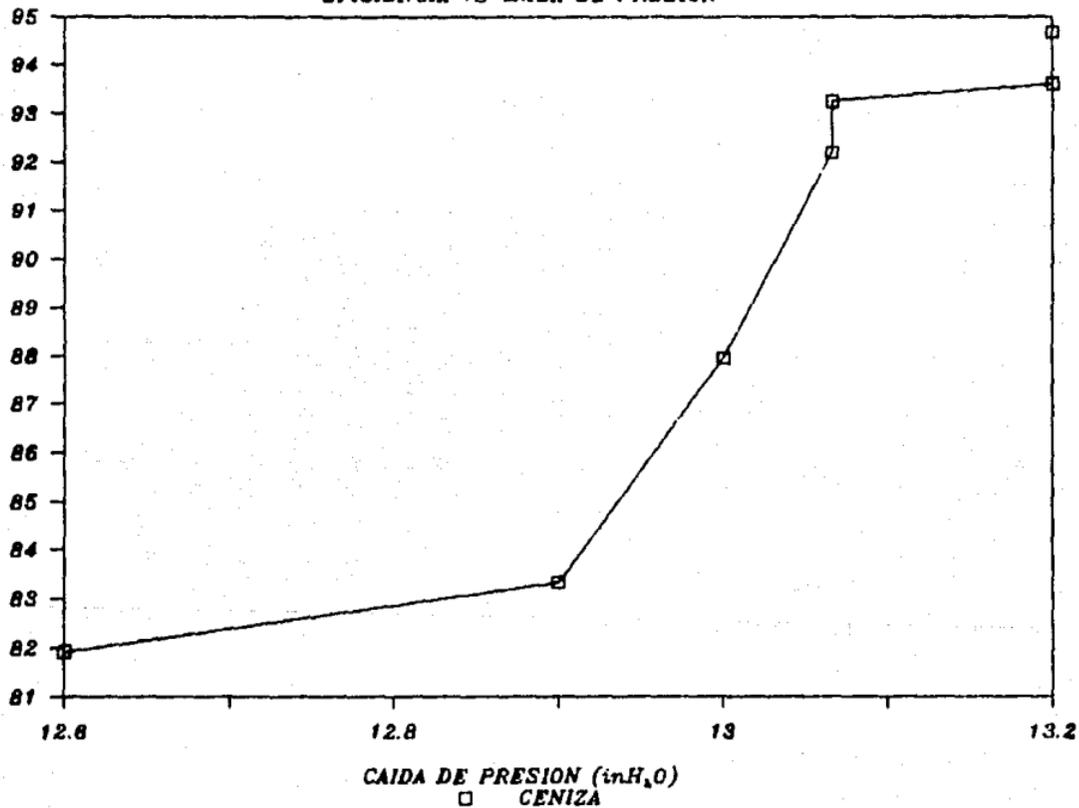
EFICIENCIA VS CAIDA DE PRESION



GRAFICA 5

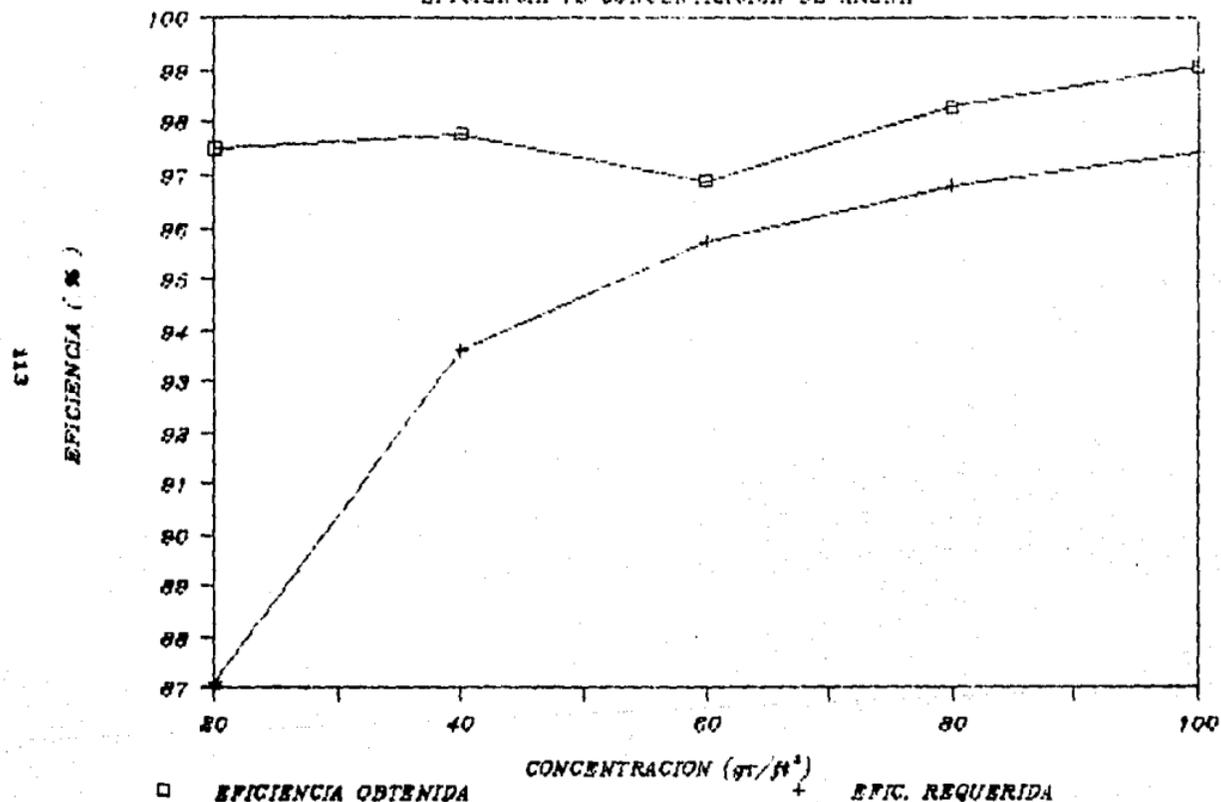
EFICIENCIA VS CAIDA DE PRESION

112
EFICIENCIA (%)



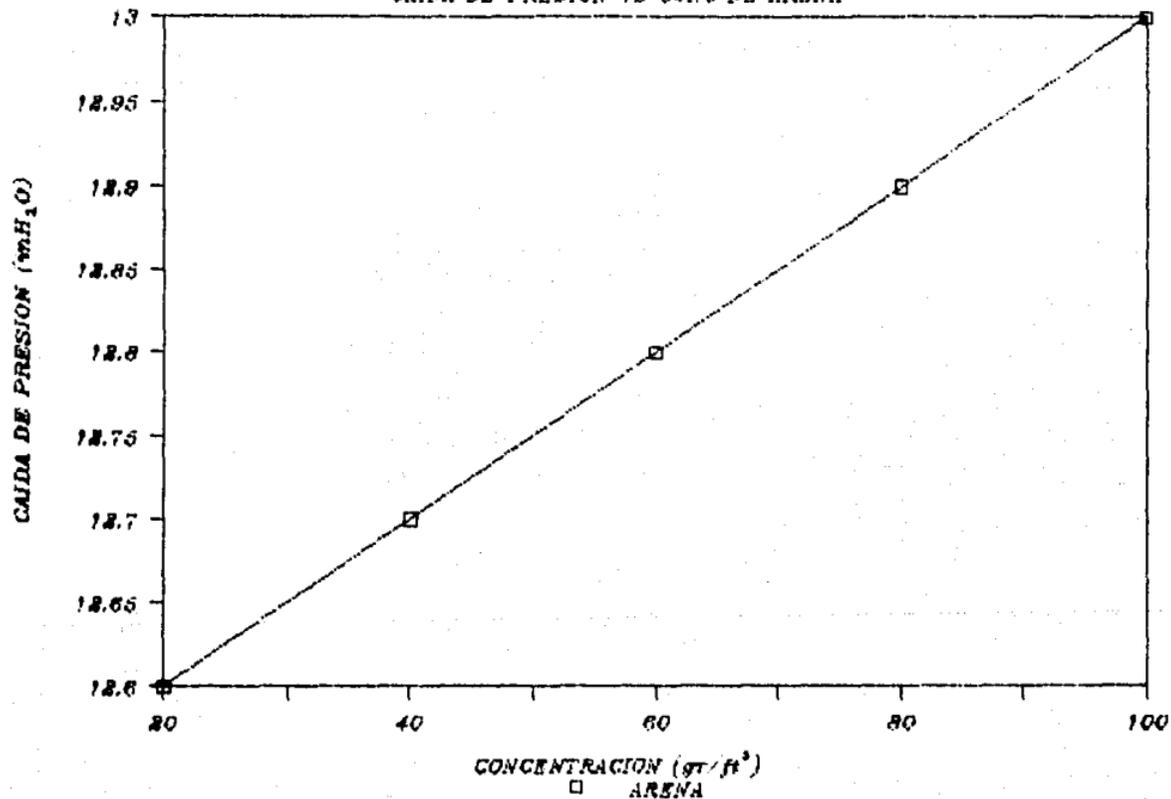
GRAFICA 6

EFICIENCIA VS CONCENTRACION DE ARENA



GRAFICA 7

CAIDA DE PRESION VS CONC DE ARENA



CAPITULO 7

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Basándonos en las características de la fuente de succión disponible, se logró dimensionar un lavador de gases tipo venturi, el cual funcionó adecuadamente proporcionando resultados satisfactorios al cumplir los objetivos propuestos.

El material de construcción del lavador permitió observar que la atomización de las gotas de líquido efectivamente se lleva a cabo por la velocidad del gas que pasa por el venturi. Esta atomización proporciona los elementos de colección de partículas, en la garganta del Venturi. Desafortunadamente, la separación de las fases en el separador ciclónico no pudo observarse, debido a que su material de construcción no lo permitió.

Los requerimientos de energía en el lavador venturi dependen de la caída de presión en la garganta del tubo. Al observar la influencia que la relación líquido/gas tiene sobre la caída de presión se encontró que estas variables son directamente proporcionales, ya que al aumentar la relación L/G ocurre un aumento en la AP. De esta manera se determinó la relación L/G óptima que fue de 8 gpm/1000 cfm. En forma cualitativa se encontró que el tamaño de partícula afecta la caída de presión, pues para partículas finas ésta aumenta.

La concentración de material particulado tiene poca influencia en la caída de presión del lavador, por lo que no es necesario especificar un mayor requerimiento de energía para obtener una remoción adecuada.

El lavador construido, a pesar de ser de baja energía (14 pulgadas columna de agua), resulta adecuado para la remoción

de las partículas utilizadas ya que la eficiencia obtenida supera siempre la eficiencia requerida (de acuerdo a la legislación vigente), con lo que se tiene una emisión mucho menor a la máxima permisible por las autoridades.

El diseño del separador resulta ser adecuado para casi todas las relaciones líquido/gas ya que no se presenta arrastre de agua hacia la fuente de succión para relaciones L/G menores a 14 gpm/1000 cfm, lo que indica que la separación es completa. Para dicha relación, se observó algo de arrastre de líquido en el gas de salida por lo que no es adecuada.

El lavador diseñado puede montarse en un tren de muestreo de gases en chimeneas de industrias para poder determinar los requerimientos de energía de dicha fuente de emisión.

BIBLIOGRAFIJA

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abbott, D.: *C.E.P.* 47 - 51 (1976)
- [2] Brady, J.D.: *Plant Engineering*, 3, 53-55 (1962)
- [3] Calvert, S.: *Chem. Eng.*, 29 54-68 (1977)
- [4] Celenza, G.U., Dav y Zimmerman: *Chem. Eng. Progress*, 65 (11) 31 (1970)
- [5] Crane, (ed.): "Flujo de Fluidos", 1^o Ed. McGraw-Hill, México, D.F., (1987)
- [6] Ekman, Johnstone,: *Industrial and Eng. Chem.*, 43 (6) 1358-1370 (1951)
- [7] Johnstone, Roberts,: *Industrial and Eng. Chem.*, 41 (11) 2417-2423 (1949)
- [8] Johnstone, Tassler,: *Industrial and Eng. Chem.*, 46 (8) 1601-1608 (1954)
- [9] Jones, W.P.: *Industrial and Eng. Chem.*, 41 (11) 2424-2427 (1949)
- [10] Licht, W.: "Air Pollution Control Engineering", 1^o Ed. Marcel Dekker INC, U.S.A., (1980)
- [11] Marks, L.S.: "Mechanical Engineers Handbook", 5^o Ed. McGraw-Hill, U.S.A., (1951)
- [12] McCabe, W.L., y Smith, J.C.: "Unit Operations of Chemical Engineering", 2^o Ed. McGraw-Hill, U.S.A., (1967)

- [13] McIlvaine. (ed.): "The McIlvaine Scrubber Manual".
McIlvaine Co., U.S.A., (1974)
- [14] Perry, R.H. (ed.): "Chemical Engineer's Handbook", 4^a
Ed. McGraw-Hill, U.S.A., (1963)
- [15] Placec. Peters: *AIChE Journal*, 27 (6) 984-993 (1981)
- [16] Ranz, W.: *Industrial and Eng. Chem.*, 44 (6) 1371-1381
(1952)
- [17] Sargent, G.D.: *Chem. Eng.*, 27 (1) 130-150 (1969)
- [18] Salvat (ed.): "La Contaminación", 1^a Ed. Salvat
Editores S.A., España (1973)
- [19] (Catálogo) Advanced Industrial Technology Corp.
- [20] (Catálogo) Ducon Environmental Technology
- [21] (Catálogo) Croll - Reynolds Co. INC.
- [22] (Catálogo) General Resource Corp.
- [23] Diario Oficial de la Federación: Tomo CDXXI 12,
México, D.F., 13 (18/10/1988), 23 (19/10/1988)