

CAPÍTULO 4

4 SISTEMA DE REMOCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

Una vez que la descarga gaseosa proveniente del incinerador de desechos hospitalarios ha sido enfriada hasta unos 69 °C, ésta pasará al sistema de remoción de partículas, el cual consistirá de un lavador húmedo tipo Venturi.

Si bien es cierto parte de las partículas serán removidas en la cámara de enfriamiento, es necesario indicar que las características de ésta no proveen una buena remoción del material particulado, debido principalmente a la baja velocidad relativa entre los flujos involucrados en el proceso; como se verá mas adelante, la eficiencia de los lavadores húmedos depende de dicha velocidad. Por esta razón se espera que la descarga gaseosa que sale de la cámara de enfriamiento contenga aún partículas, especialmente finas, por lo que el diseño del colector estará dirigido a remover tales partículas.

Por otro lado cabe señalar, que como medida para asegurar la remoción, tanto de partículas como de gases contaminantes, se considerará que no existe remoción de estas sustancias en la cámara de enfriamiento; de esta forma no se requerirá sobredimensionar los equipos de control para asegurar su buen desempeño. Entonces la carga de las sustancias a removerse será la misma que se determinó en el capítulo 1 de este trabajo.

Aunque el objetivo en esta parte de la tesis es describir el funcionamiento y ejecutar el diseño de un lavador Venturi, se presentarán también de forma general las principales técnicas aplicables a la remoción de material particulado, tratando en lo posible de destacar las razones que condujeron a seleccionar el mencionado lavador de partículas como la mejor opción.

4.1 Principales mecanismos empleados en la remoción de partículas

Aunque existe una variedad de dispositivos destinados al control de emisiones de partículas al aire, cada uno de ellos opera por medio de uno, o por la combinación de los siguientes mecanismos

- Separación mecánica
- Lavado
- Precipitación electrostática
- Filtración

Separación mecánica

Este mecanismo se basa en la acción de una fuerza externa sobre las partículas contenidas en la descarga gaseosa, de tal manera que mientras estas son retenidas en el dispositivo, el gas continúa su trayectoria hacia fuera del equipo, libre de partículas o con una menor concentración de éstas.

Los dispositivos de separación mecánica más conocidos, son el ciclón y la cámara de sedimentación, para los cuales las fuerzas responsables de la remoción de partículas, son la centrífuga y la gravitacional respectivamente.

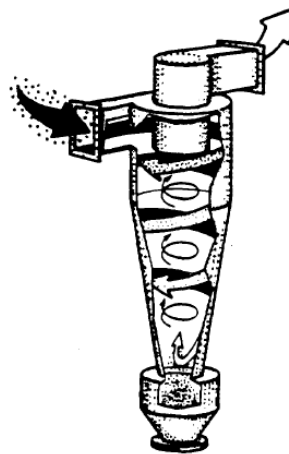


Figura 4.1 Ciclón – dispositivo de separación mecánica

En un ciclón, la fuerza centrífuga es inducida por el continuo cambio en la dirección de la corriente gaseosa dentro de una cámara cilíndrica especialmente diseñada, de manera que el flujo ingresa de

forma tangencial a las paredes internas del aparato e inicia un movimiento en forma espiral. Esto, unido al hecho de que las partículas tienden a seguir una trayectoria rectilínea, provoca que éstas últimas impacten contra las paredes del dispositivo, logrando así su separación de la corriente gaseosa.

Como regla general, un ciclón no resulta adecuado para remover partículas finas, y de hacerlo presentaría una alta e inconveniente caída de presión. Se puede citar las siguientes ventajas que ofrece un ciclón:

- Bajo costo instalado y de mantenimiento
- Operación con gases a alta temperatura

Los ciclones son aparatos sencillos y no utilizan partes que deban ser reemplazadas o requieran continuo mantenimiento; de ahí la ventaja respecto a costos.

En las cámaras de sedimentación, la corriente gaseosa es dirigida hacia una cámara aproximadamente rectangular, en la cual, debido al cambio de sección transversal, el gas se desacelera junto con las partículas que transporta, de manera que éstas tienen menos potencial para fluir en la dirección horizontal y son atraídas hacia el fondo de la cámara por efecto de la gravedad.

De los dispositivos que actúan por separación mecánica, el más adecuado es el ciclón; éste ha sido utilizado desde hace más de 100

años, convirtiéndose así en uno de los colectores de partículas mas importantes de la industria, razón por la cual se puede decir que siempre será una alternativa a considerar en la mayoría de problemas de control de partículas.

Lavado

El mecanismo de lavado (scrubbing), consiste en hacer pasar el gas cargado con partículas por una cámara en la cual es puesto en contacto directo con un líquido, que generalmente es agua, de tal forma que las partículas a removerse son colectadas en las gotas del líquido.

La forma más conveniente de clasificar los lavadores de partículas, parece ser aquella en la que se considera la energía que demanda el dispositivo para mover el fluido en su interior; de manera que los lavadores se clasifican en:

- Lavadores de baja energía
- Lavadores de energía moderada, y
- Lavadores de alta energía

El lavador de baja energía mas representativo, es la cámara de rociado ó spray, para la cual el consumo de energía para mover el gas está entre 0.5 y 2 hp / 1000 cfm de gas tratado. Este es el tipo de lavador más sencillo, y aunque es el menos eficiente de los

lavadores, es capaz de remover partículas mayores a $8\ \mu\text{m}$ en un 90%.

Un lavador de energía moderada, es la cámara de rociado ciclónica, en la cual el gas se hace ingresar de forma tangencial en una cámara equipada con toberas rociadoras.

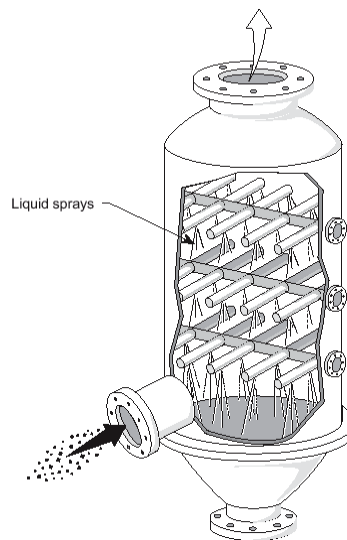


Figura 4.2 Lavador de partículas tipo cámara de spray

De esta forma, la eficiencia de remoción se puede incrementar al reducir el tamaño de las gotas, pues éstas serán separadas del gas de manera similar a como se haría en un ciclón. Con este tipo de lavador se puede conseguir remover partículas mayores a $5\ \mu\text{m}$ con una eficiencia de 95 % y un consumo de energía que oscila entre 1 y 3.5 hp / 1000 cfm.

El lavador de partículas más eficiente es el de alta energía, el cual posee la capacidad de remover partículas mayores a $0.5\ \mu\text{m}$ con una

eficiencia de hasta 98%. Estos dispositivos son conocidos como lavadores Venturi; el consumo de energía es mayor que en otros tipos de lavadores y típicamente oscila entre 3 y 10 hp / 1000 cfm, posteriormente se tratará este tipo de lavador con mayor detalle.

El mecanismo de lavado para remover partículas presenta un buen número de ventajas, tales como

- Eficiencia de colección relativamente alta
- Permite manejar gases inflamables con poco riesgo
- Reducción en la temperatura de gases calientes
- Pueden utilizarse para remover al mismo tiempo gases y partículas
- Permiten variar su eficiencia de colección con facilidad
- Control de partículas sólidas o líquidas

Desafortunadamente, el número de desventajas que presenta el mecanismo de lavado también es importante; estas son

- Pueden presentarse problemas de corrosión
- Tanto el líquido de lavado como los sedimentos producidos pueden generar contaminación al ser desechados
- El alto incremento en la humedad del gas hace visible la descarga en la chimenea a menos que se recaliente el gas
- No se puede recuperar las partículas tal como son generadas en la fuente

Aunque obviamente la humedad no constituye un problema para el aparato, ésta si podría afectar a equipos colocados aguas abajo del lavador, por lo cual debe considerarse tal aspecto.

Precipitación electrostática

Este mecanismo de remoción es llevado a cabo por medio de aparatos conocidos como precipitadores electrostáticos (ESP's), en los cuales las partículas son atrapadas por la acción de fuerzas electrostáticas generadas por el precipitador. En estos dispositivos, el gas contaminado es ionizado al fluir a través de electrodos cargados eléctricamente (positiva o negativamente), de manera que la carga es transferida a las partículas contenidas en el flujo gaseoso. Una vez que las partículas han sido cargadas eléctricamente, éstas van a ser atraídas hacia unas placas colectoras; la razón por la cual las partículas migran hacia las placas, es que éstas últimas por lo general van a estar conectadas a tierra, por ello la carga tenderá a eliminarse por medio de ellas, ya sea positiva o negativa. De esta forma las partículas son separadas de la corriente gaseosa y caen hasta el fondo del aparato donde son colectadas.

Los precipitadores electrostáticos son capaces de manejar volúmenes muy grandes de gas logrando eficiencias de remoción de hasta 99.9% aún para partículas tan pequeñas como $0.05 \mu\text{m}$; tanto

partículas sólidas como líquidas pueden colectarse con este dispositivo, sin embargo el desempeño del equipo depende de las propiedades de las partículas, especialmente de la resistividad de éstas. Las ventajas que ofrece la precipitación electrostática son:

- Alta eficiencia de colección, inclusive para partículas muy pequeñas
- Puede manejar grandes volúmenes de gas
- Permite la recuperar el material colectado ya sea sólido o líquido
- Puede manejar gases a alta temperatura
- Caída de presión pequeña
- Bajo costo de operación

Un precipitador electrostático presenta una caída de presión muy pequeña, por lo cual no se requiere mucha energía para mover el gas a través de éste; el mayor consumo de energía se debe al sistema eléctrico del aparato el cual aumenta junto con la eficiencia de remoción deseada. Las desventajas que presenta la precipitación electrostática se citan a continuación.

- Alto costo instalado
- El espacio requerido es grande
- Las variaciones en las condiciones de operación pueden afectar su buen desempeño

- Poco adecuado cuando la resistividad de las partículas es demasiado alta o demasiado baja

Adicionalmente, los principios por medio de los cuales opera un precipitador electrostático determinan que tales aparatos no sean útiles en la remoción de contaminantes gaseosos.

Filtración

Este mecanismo de remoción de partículas es llevado a cabo mediante dispositivos llamados filtros, los cuales son estructuras porosas elaboradas con materiales fibrosos o granulados. Cuando el gas pasa a través de los diminutos espacios que quedan entre las fibras, las partículas son retenidas en la estructura del filtro y la fracción de partículas que logren atravesarlo dependerá de las características de éste. Así por ejemplo se tienen filtros con eficiencias superiores al 97% como los de tipo plegado utilizados en aire acondicionado, o filtros especiales como los HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) y ULPA (Ultra Low Penetration Air Filter) que pueden alcanzar eficiencias de 99.9% y 99.9999% respectivamente, aún para partículas de 0.1 μm ; ambos son utilizados en situaciones que exigen el aislamiento de un local respecto a su entorno, como por ejemplo las salas de cirugía de un

hospital o lugares en los que se manejan sustancias peligrosas como virus y bacterias.

El dispositivo de filtración más utilizado en el control de emisiones de partículas al aire es conocido como filtro de mangas; consiste en una serie de filtros fibrosos en forma de tubos cilíndricos (mangas) colocados en el interior de una cámara, de manera que cuando el gas atraviesa las mangas, las partículas quedan atrapadas en la estructura fibrosa del material filtrante, lográndose así la limpieza del gas.

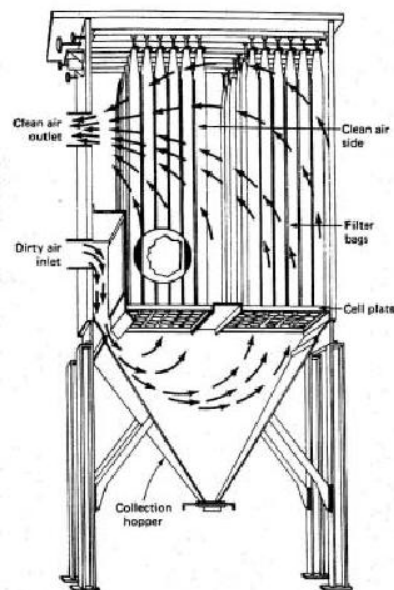


Figura 4.3 Filtro de mangas

A medida que transcurre el tiempo, el material filtrante se va a ir obstruyendo, produciéndose un aumento en la caída de presión del dispositivo, junto con un incremento en la eficiencia de remoción del

filtro de mangas. Es entonces cuando las partículas deben ser removidas de los filtros, para lo cual el fondo de la cámara que alberga las mangas servirá también como depósito de las partículas que caen al efectuar la limpieza, la cual es realizada adecuadamente sin detener el proceso.

Las ventajas que ofrece un filtro de mangas son

- Eficiencia de colección es muy alta
- Permite manejar flujos de gas pequeños o muy grandes
- Se puede utilizar para filtrar diversos tipos de polvos
- Consumo de energía moderado

Las desventajas que pueden presentarse son

- El espacio que ocupan es grande
- Riesgos de explosión e incendio ante la presencia de chispas
- El manejo de gases húmedos provoca problemas en la limpieza de las mangas
- Condiciones extremas de temperatura y corrosión pueden dañar las mangas

4.2 Lavadores de aire tipo Venturi

Los tubos Venturi, cuyo nombre se debe al físico italiano Giovanni Venturi, fueron utilizados durante mucho tiempo solamente como medidores de flujo. Johnstone (1949) y otros científicos,

descubrieron que estos dispositivos podían ser utilizados para la remoción de partículas transportadas en descargas gaseosas; esto gracias al aumento en la velocidad que se logra en los tubos Venturi. En un lavador Venturi se identifican tres zonas, que son: zona convergente, garganta y zona divergente (figura 4.4). El gas cargado con partículas ingresa a la zona convergente, donde debido al cambio gradual en la sección transversal por donde fluye, se producirá un incremento en la velocidad del gas hasta alcanzar un valor máximo en la zona que se conoce como garganta.

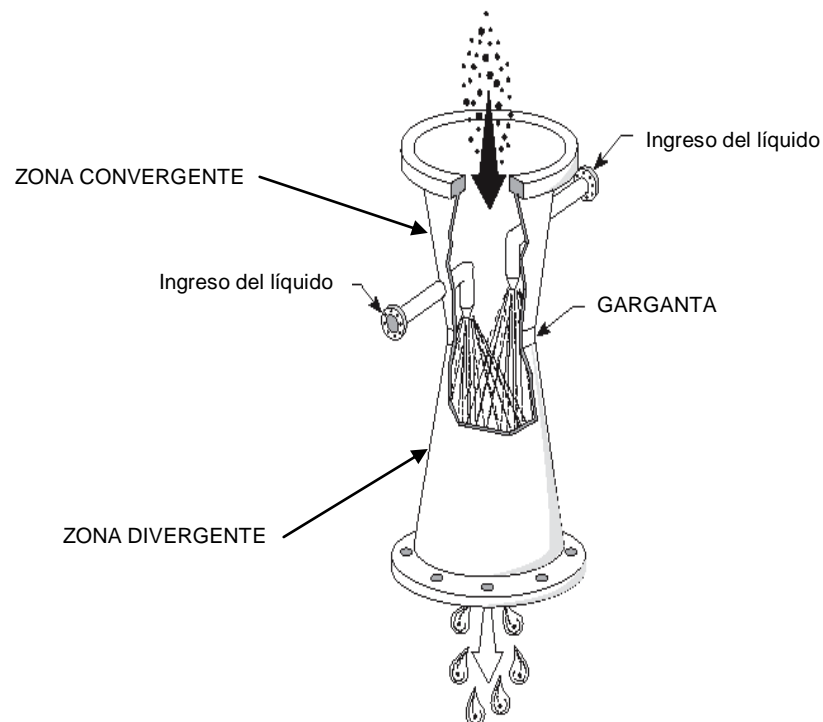


Figura 4.4 Identificación de zonas y principio de operación de un lavador Venturi

Para llevar a cabo la captación de partículas, se inyecta agua en la zona donde el gas, y por lo tanto las partículas alcanzan su mayor velocidad, produciéndose así el rompimiento de la tensión superficial del agua y dando lugar a la formación de pequeñas gotas del líquido. Esto resultará en el contacto físico entre las gotas del líquido de lavado y las partículas, de manera que éstas últimas serán removidas de la descarga gaseosa.

La velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas a removerse, es el parámetro más importante en todo lavador de gases destinado a la remoción de partículas. Esto se debe a que los mecanismos físicos por los cuales las partículas son capturadas en la gotas del líquido, dependen directamente de dicha velocidad.

Los mecanismos de colección que intervienen en un lavador de partículas, cualquiera sea su tipo, son: Impacto inercial, Intercepción y Difusión. De éstos, el principal mecanismo de remoción es el impacto inercial, el cual se lleva a cabo cuando las partículas tienen la inercia suficiente para abandonar la trayectoria de flujo del gas que las transporta, de manera que mientras el gas se desvía alrededor de las gotas del líquido, las partículas impactan contra la superficie de las gotas; partículas con diámetro mayor a 10 μm son colectadas comúnmente por este mecanismo.

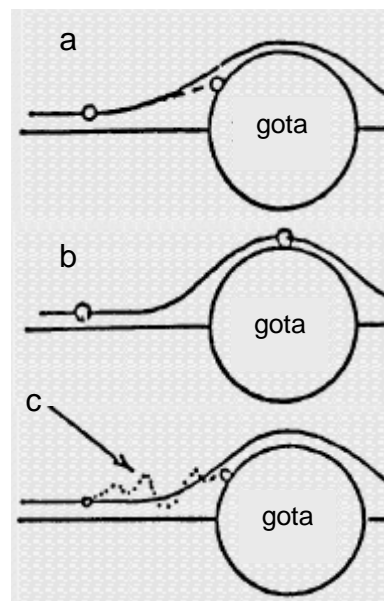


Figura 4.5 Mecanismos de colección: a. Impacto inercial; b. Intercepción; c. Difusión

Las partículas que siguen la trayectoria de las líneas de flujo del gas, no serán atrapadas por impacto inercial, sin embargo cuando estas pasan muy cerca de las gotas se va a producir el contacto superficial entre ambas de manera que quedan adheridas. A este mecanismo de colección se lo conoce como intercepción y predomina para partículas de $0.1 \mu\text{m}$ a $10 \mu\text{m}$.

Partículas menores a $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro, e inclusive aquellas menores a $0.5 \mu\text{m}$ están sujetas al mecanismo de difusión, el cual se lleva a cabo por el movimiento browniano de las partículas, causado por colisiones aleatorias con las moléculas del gas, de manera que

cuando la trayectoria de las gotas y de las partículas coincide, éstas últimas quedarán atrapadas.

A mayor velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas, mayores serán las posibilidades de que se lleve a cabo la captación de partículas, pues los mecanismos de impacto inercial e intercepción son beneficiados con el aumento de dicha velocidad. Por eso, un lavador Venturi puede inclusive ser utilizado para remover partículas del tipo $PM_{2.5}$.

Los principales parámetros que influyen sobre el desempeño de un lavador Venturi son

- Distribución de tamaño de partícula y cantidad de material particulado
- Temperatura, humedad y flujo de la corriente gaseosa
- Velocidad del gas y caída de presión
- Relación líquido a gas
- Tamaño de las gotas del líquido
- Tiempo de residencia

La distribución de tamaño de partícula determinará la eficiencia global de colección que tiene el aparato, pues partículas de tamaño diferente no serán colectadas con la misma eficiencia debido al predominio de un determinado mecanismo de colección (impacto inercial, intercepción o difusión) para un determinado tamaño de

partícula.; adicionalmente, conociendo la eficiencia global de colección se puede determinar cuánto material particulado será removido de la corriente gaseosa.

Parámetros como el flujo del gas, su temperatura y su humedad, determinarán la cantidad del líquido de lavado que se evaporará; a mayor evaporación, mayor será la cantidad del líquido que deba inyectarse para tratar el gas. El flujo del gas determinará el tamaño que debe tener el lavador.

Como ya se había mencionado, la velocidad del gas influye sobre la eficiencia de colección de un lavador húmedo, especialmente porque a mayor velocidad relativa entre las partículas y las gotas del líquido, mayor será la acción de los mecanismos de impacto inercial e intercepción en la captación de partículas. Por otro lado, al aumentar la velocidad significa que habrá también un aumento en la caída de presión, lo cual determina que debe haber un equilibrio razonable entre ambas variables.

La relación líquido – gas L/G representa el volumen de líquido que debe inyectarse para tratar un volumen determinado de gas, mientras mayor es dicha relación, se puede esperar también una mayor eficiencia de colección en el lavador.

Se podría pensar que un mayor diámetro en las gotas del líquido de lavado sería beneficioso para el desempeño de un lavador de gases;

sin embargo a mayor tamaño de las gotas, menor es el área superficial disponible para la captación de partículas. Por otro lado, un tamaño muy reducido provocaría que la corriente gaseosa acelere rápidamente las gotas a la velocidad del gas, reduciendo de esta forma la velocidad relativa, e inclusive arrastrando el líquido de lavado fuera de la cámara. Por ello el diámetro adecuado de las gotas del líquido fluctúa entre 500 μm y 1000 μm .

Por último, la longitud de la garganta y de la zona divergente del lavador Venturi deberá ser tal que permita el contacto suficiente entre las gotas y las partículas, por lo menos hasta que las gotas sean aceleradas hasta la velocidad del gas; una vez que las gotas del líquido de lavado y las partículas alcanzan la misma velocidad, los principales mecanismos de colección (impacto inercial e intercepción) reducen su acción drásticamente.

4.3 Diseño del lavador Venturi

Antes de proceder al diseño del dispositivo, se presentan a continuación las ecuaciones y conceptos fundamentales requeridos para diseñar un lavador de partículas tipo Venturi. Cabe indicar que aunque parte de la teoría es aplicable a otro tipo de lavadores, la información que aquí se presenta está dirigida solamente a lavadores Venturi.

Distribución de tamaño de partícula y eficiencia de colección

Las partículas que se presentan en situaciones reales, difícilmente son esféricas, por ello se desarrolló el concepto de “diámetro aerodinámico”, que esencialmente es el diámetro que tendría una partícula esférica de densidad igual al agua (1000 kg/m^3), para sedimentarse en aire tranquilo a la misma velocidad que la partícula verdadera. Las partículas que se emiten en una descarga gaseosa contaminada, por lo general presentarán diversos diámetros aerodinámicos, de manera que al distribuir las por rangos, las partículas correspondientes a cada uno de esos rangos representarán un porcentaje de la masa total del muestreo, obteniéndose así la distribución de tamaño de partícula. Tal distribución aporta con información indispensable para el diseño de equipos de control de partículas.

Debido a que la eficiencia de remoción de un determinado equipo de control varía de un rango a otro, es necesario expresar tal eficiencia para cada uno de los rangos. Por ello, para una distribución de tamaño de partícula con j rangos, la eficiencia global de colección η_o será igual a la sumatoria de las eficiencias fraccionales de cada rango, o sea

$$\eta_o = \sum \eta_j \cdot m_j \quad (4.1)$$

donde

η_j = eficiencia de colección para el j-ésimo rango

m_j = masa en porcentaje del j-ésimo rango

De esta forma, la cantidad total de material particulado que puede removerse con el equipo de control está relacionada con su eficiencia global por medio de la siguiente relación

$$\eta_o = \frac{m_i - m_o}{m_i} \cdot 100 \quad (4.2)$$

donde m es el flujo másico de la carga de partículas, y los subíndices i y o se refieren a los valores a la entrada y salida del equipo.

La penetración P_t se define como la fracción de partículas de un diámetro específico que no son capturadas y que por lo tanto logran atravesar el equipo de remoción; se relaciona con la eficiencia de remoción por medio de

$$P_t = 1 - \eta \quad (4.3)$$

Parámetro de impacto

Un valor importante en el diseño de lavadores de partículas es el número de impacto o parámetro de impacto K_p , que se define como

$$K_p = \frac{2 \cdot x_s}{d_d} \quad (4.4)$$

donde x_s es la distancia de parada de una partícula proyectada en un aire estacionario y d_d es el diámetro de una gota del líquido de lavado que se encuentra en su trayectoria también en estado estacionario.

El número de impacto K_p describe el comportamiento del impacto inercial, el cual es el principal mecanismo de colección en lavadores húmedos; si K_p es grande entonces un buen número de partículas impactarán las gotas del líquido, en cambio si K_p es pequeño, las partículas tenderán a seguir las líneas de flujo alrededor de las gotas.

Se puede demostrar que para partículas en el régimen de Stokes ($Re \leq 1$), el reemplazo de la distancia x_s en la ecuación (4.4) da origen a la siguiente ecuación

$$K_p = \frac{K_c \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_p}{9 \cdot \mu_g \cdot d_d} = \frac{d_a^2 \cdot V_p}{9 \cdot \mu_g \cdot d_d} \quad (4.5)$$

donde

K_c = factor de corrección de Cunningham

ρ_p = densidad de partícula, g/cm³

d_p = diámetro físico de partícula, cm

V_p = velocidad de partícula (igual a la del gas), cm/s

d_d = diámetro de las gotas, cm

μ_g = viscosidad del gas, Poise

d_a = diámetro aerodinámico de partícula, cm

El factor K_c , se utiliza para incluir los efectos de deslizamiento en partículas muy pequeñas, de tamaño cercano a la trayectoria media libre de las partículas del gas. Esto se da comúnmente en partículas menores a 5 μm .

Formación de las gotas en un lavador Venturi

Los lavadores Venturi son dispositivos que proveen por si mismos la formación de las gotas de líquido, pues la energía requerida para la atomización del líquido de lavado la proveerá la corriente gaseosa acelerada en la garganta del dispositivo. Esta atomización neumática de doble fluido (gas y agua), puede presentarse en dos formas: atomización tipo gota y atomización tipo nube.

La primera se lleva a cabo cuando por medio de toberas de diámetro interno menor a 1 mm, el líquido es inyectado en la corriente gaseosa que fluye a gran velocidad, resultando así el rompimiento de la tensión superficial del agua y la formación de pequeñas gotas, mientras que para la segunda se utiliza toberas de mayor tamaño, generando diminutas gotas agrupadas en forma de una pequeña nube.

En este trabajo se considera la atomización tipo gota; aunque se producirá un amplio rango de tamaño de las gotas, es posible predecir un diámetro promedio utilizando la ecuación de Nukiyama-Tanasawa. A éste, se lo conoce como diámetro de Sauter y se calcula por medio de

$$d_d = \frac{58600}{V_G} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \cdot \left(\frac{\mu_L}{\sigma \cdot \rho_L} \right)^{0.45} \left(1000 \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5} \quad (4.6)$$

donde

d_d = diámetro medio de Sauter para las gotas, μm

V_G = velocidad del gas, cm/s

σ = tensión superficial del líquido, dinas/cm

ρ_L = densidad del líquido, g/cm^3

μ_L = viscosidad del líquido, poise

Q_L = flujo volumétrico del líquido, m^3/s

Q_G = flujo volumétrico del gas, m^3/s

Penetración

Aunque se han desarrollado varias ecuaciones para predecir la penetración y por lo tanto la eficiencia de colección en un lavador de partículas tipo Venturi, una de las más completas es la que desarrolló Calvert (1972), para la cual tomó en cuenta aspectos tales como el

tamaño de las gotas, el parámetro de impacto, la concentración de las gotas a través de la garganta del Venturi, y el cambio continuo de velocidad entre las partículas y las gotas.

Por lo tanto, la penetración para un diámetro de partícula dado se calcula por medio de

$$P_t = EXP \left\{ \frac{Q_L \cdot V_G \cdot \rho_L \cdot d_d}{55 \cdot Q_G \cdot \mu_G} \cdot \left[-0.7 - K_p \cdot f' + 1.4 \cdot LN \left(\frac{K_p \cdot f' + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + K_p \cdot f'} \right] \frac{1}{K_p} \right\} \quad (4.7)$$

donde

K_p = parámetro de impacto calculado con la ecuación 4.5 para la velocidad del gas a la entrada de la garganta

f' = factor empírico

los demás parámetros y sus unidades, son los mismos de las ecuaciones anteriores; el diámetro de Sauter d_d debe estar en cm. El factor f' se puede tomar como 0.25 para partículas hidrofóbicas y 0.50 para partículas hidrofílicas.

Sin embargo, a partir de datos experimentales, Hesketh [2] encontró que un lavador Venturi es esencialmente 100% eficiente para partículas mayores a 5 μm , y que la penetración para partículas menores a ese valor, se relacionaba con la caída de presión (en in H_2O) a través del dispositivo por medio de la siguiente relación

$$P_t = 3.47 \cdot (\Delta P)^{-1.43} \quad (4.8)$$

Debido a que la ecuación 4.7 está en función de K_p , que es característico del mecanismo de impacto inercial, consideramos conveniente hacer uso de la ecuación 4.8 para partículas menores a $5 \mu\text{m}$, por lo cual la penetración se determinará por medio de las dos ecuaciones anteriores de acuerdo al diámetro aerodinámico que se analice.

Caída de presión en un lavador Venturi

Es importante conocer la caída de presión a través del dispositivo, pues de ello dependerá la demanda de energía requerida para mover el gas a través del dispositivo. En este trabajo, para calcular la caída de presión se utilizará la siguiente relación

$$\Delta P = 2 \cdot \rho_L \cdot V_G^2 \cdot \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \cdot \left(-X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right) \quad (4.9)$$

donde ΔP es la caída de presión en dinas/cm², y los demás factores y sus unidades son los mismos que en las ecuaciones anteriores. El valor de X debe ser calculado por medio de

$$X = \frac{3 \cdot l_t \cdot C_D \cdot \rho_G}{16 \cdot d_d \cdot \rho_L} + 1 \quad (4.10)$$

donde

X = longitud adimensional de la garganta

l_t = longitud de la garganta, cm

C_D = coeficiente de arrastre para las gotas en función del diámetro de Sauter

Los demás factores y sus unidades son los mismos de las ecuaciones anteriores, incluido d_d que es el diámetro medio de Sauter. Por lo general, en un lavador Venturi las condiciones son tales que el número de Reynolds está entre 10 y 500; en ese rango el valor de C_D puede calcularse con

$$C_D = \frac{24}{Re_D} + \frac{4}{Re_D^{1/3}} \quad (4.11)$$

A su vez, la longitud de la garganta l_t debe ser suficiente para proveer la eficiencia de remoción deseada, sin embargo si es demasiado larga, existirá un desperdicio de energía innecesario en el dispositivo.

La longitud óptima de la garganta puede calcularse con [2] :

$$l_t = \frac{2 \cdot d_d \cdot \rho_L}{C_D \cdot \rho_G} \quad (4.12)$$

donde todos los factores y sus unidades ya han sido presentados.

Aspectos generales del diseño de un lavador Venturi

Básicamente un lavador Venturi puede ser diseñado según las mismas características de un Venturi utilizado para la medición de flujo, aunque para disminuir su longitud total, los ángulos de convergencia y divergencia pueden ser mayores. Al diseñar un lavador de partículas de este tipo, algunos parámetros deben ser seleccionados arbitrariamente por el diseñador. Sin embargo existen valores óptimos que son sugeridos por varios autores [2] [12] [16] y aunque existen ligeras diferencias de un texto a otro, resulta adecuado utilizarlos como guía para asumir valores indispensables en el diseño.

La siguiente tabla muestra los valores más adecuados a elegir al momento de diseñar un lavador de partículas tipo Venturi.

TABLA 28
VALORES RECOMENDABLES PARA EL DISEÑO
DEL LAVADOR DE PARTÍCULAS

Velocidad del gas en la garganta

$V_G > 4575$ cm/s	Alta eficiencia de remoción de PM
$2000 < V_G < 2300$ cm/s	Absorción y remoción de PM simultáneas

Relación Líquido – Gas

$0.26 < L/G < 2.6$ l/m ³	Remoción de PM
$5.5 < L/G < 11$ l/m ³	Absorción de gases y remoción de PM

Caída de presión

$10 < \Delta P < 150$ in H ₂ O	Inferior en aplicaciones de absorción
---	---------------------------------------

Dimensiones típicas

Área de entrada / Área de la garganta = 4:1
Ángulo de convergencia = 12.5°
Ángulo de divergencia = 3.5°

4.3.1 Dimensionamiento del dispositivo

Para dimensionar el lavador Venturi, primero debemos asumir una velocidad adecuada en la garganta; por ello de la tabla 28 asumimos que $V_G = 4600$ cm/s

Habiéndose incrementado la humedad del gas en la etapa de enfriamiento, el flujo molar de los gases es 15281.13 mol/h; a

una temperatura de 68°C (341.48 K) y 1 atm de presión el flujo de los gases sería

$$G = \frac{n \cdot R_u \cdot T}{P}$$

$$G = \frac{15281.13 \text{ mol/h} \times 8.314 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 341.48 \text{ K}}{101300 \text{ Pa}}$$

$$G = 427.67 \text{ m}^3/\text{h} = 0.118 \text{ m}^3/\text{s}$$

De manera que el diámetro de la garganta D_2 se halla de la manera siguiente

$$G = V_G \cdot A_2$$

$$A_2 = \frac{G}{V_G}$$

$$A_2 = \frac{0.118 \text{ m}^3/\text{s}}{46 \text{ m/s}}$$

$$A_2 = 2.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\rightarrow D_2 = 5.73 \text{ cm}$$

El diámetro del ducto a la entrada del lavador será 10 cm, por lo que el lavador de partículas tendrá el mismo diámetro en la entrada a la zona convergente, entonces

$$\rightarrow D_1 = 10 \text{ cm}$$

Debido a que el ángulo de convergencia sugerido en la tabla 28 es 12.5° , entonces la longitud de la zona convergente se encuentra de la manera siguiente

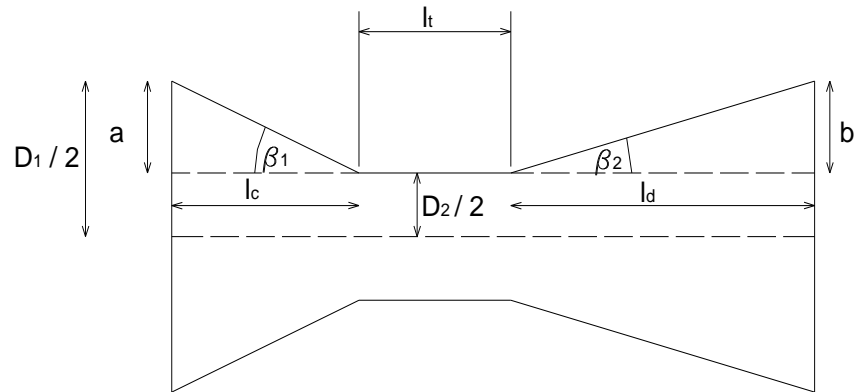


Figura 4.6 Esquema para dimensionar el lavador de partículas

Según la figura anterior, el valor de a es

$$a = \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2}$$

$$a = 5 \text{ cm} - 2.865 \text{ cm}$$

$$a = 2.135 \text{ cm}$$

Por lo tanto, la longitud de la zona convergente l_c se calcula como

$$l_c = \frac{a}{\text{Tg}(\beta_1)}$$

$$l_c = \frac{2.135 \text{ cm}}{\text{Tg}(2.5^\circ)}$$

$$\rightarrow l_c = 9.62 \text{ cm}$$

El diámetro del ducto en la zona divergente lo asumimos en 10 cm; con este diámetro se obtiene aproximadamente una relación de área 4:1 como sugiere la tabla 28.

Conociendo el diámetro a la salida, la longitud de la zona divergente se calcula de manera similar a la de la zona convergente:

$$l_d = \frac{b}{\text{Tg}(\alpha_2)}$$

$$l_d = \frac{2.135 \text{ cm}}{\text{Tg}(6.5^\circ)}$$

$$\rightarrow l_d = 34.90 \text{ cm}$$

aunque la longitud de la garganta depende de cálculos posteriores, en esta parte podemos anticipar que su valor es 35.02 cm, de manera que las dimensiones finales del lavador Venturi son

Longitud de la zona convergente: $l_c = 96 \text{ mm}$

Longitud de la garganta: $l_t = 350 \text{ mm}$

Longitud de la zona divergente: $l_d = 349 \text{ mm}$

Diámetro de la garganta: $D_2 = 57 \text{ mm}$

Diámetro en la entrada: $D_1 = 100 \text{ mm}$

Diámetro en la salida: $D_3 = 100 \text{ mm}$

Detalles del diseño en la sección planos (planos 12 y 13)

4.3.2 Determinación de la eficiencia de remoción

Para hallar la eficiencia de colección global del lavador de partículas es necesario hacer el análisis para cada rango de tamaño de partícula [1]. Para el rango comprendido entre 10 y 100 μm (tabla 15), el diámetro aerodinámico promedio de las partículas es 55 μm , y el porcentaje de la masa total que corresponde a ese rango es 35%.

Antes de hacer los cálculos es necesario asumir el factor L/G, por lo cual a partir de la tabla 28, escogemos que dicho valor será 1.02 litros/ m^3 (0.00102 m^3/m^3). Entonces

$$\frac{L}{G} = 0.00102$$

$$\rightarrow Q_L = 0.00102 \cdot Q_G$$

$$Q_L = 0.00102 \cdot 0.118 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rightarrow Q_L = 1.21 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (1.92 \text{ gpm})$$

Las propiedades del gas a 68°C son: densidad del gas: $\rho_G = 1.03 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, viscosidad del gas: $\mu_G = 2.04 \times 10^{-4} \text{ poise}$.

El agua a utilizarse se la tomará del mismo tanque de recirculación de la cámara de enfriamiento, por lo que tendrá una temperatura aproximadamente igual a la de saturación adiabática, o sea 61°C, (142°F); a esa temperatura las propiedades del agua son: densidad del líquido: $\rho_L = 0.98 \text{ g/cm}^3$

viscosidad del líquido: $\mu_L = 4.88 \times 10^{-3}$ poise, tensión superficial:
 $\sigma = 65.9$ dinas/cm; de manera que utilizando la ecuación 4.6 y
 asumiendo atomización tipo gota, el diámetro promedio de las
 gotas es

$$d_d = \frac{58600}{4600 \text{ cm/s}} \cdot \left(\frac{65.9 \text{ dyn/cm}}{0.98 \text{ g/cm}^3} \right)^{0.5} +$$

$$597 \cdot \left(\frac{0.00488 \text{ P}}{65.9 \text{ dyn/cm} \cdot 0.98 \text{ g/cm}^3} \right)^{0.45} \left(1000 \cdot \frac{1.21 \times 10^{-4}}{0.118} \right)^{1.5}$$

$$\rightarrow d_d = 125.99 \mu\text{m}$$

por lo tanto tomando el diámetro aerodinámico promedio del
 rango, el parámetro de impacto se calcula como

$$K_p = \frac{(55 \times 10^{-4} \text{ cm})^2 \cdot 4600 \text{ cm/s}}{9 \cdot 2.04 \times 10^{-4} \text{ P} \cdot 125.99 \times 10^{-4} \text{ cm}}$$

$$\rightarrow K_p = 6015.45$$

Entonces a partir de la ecuación 4.7 y tomando el factor $f' = 0.5$,
 la penetración para el diámetro de partícula en cuestión resulta

$$Pt = \text{EXP} \left\{ \frac{1.21 \times 10^{-4} \cdot 4600 \cdot 0.98 \cdot 126 \times 10^{-4}}{55 \cdot 0.118 \cdot 2.04 \times 10^{-4}} \cdot \left[0.7 - 6015.45 \cdot 0.5 + \right. \right.$$

$$\left. \left. 1.4 \cdot \text{LN} \left(\frac{6015.45 \cdot 0.5 + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + 6015.45 \cdot 0.5} \right] \cdot \frac{1}{6015.45} \right\}$$

$$\rightarrow Pt = 0.0764$$

$$\rightarrow \eta = 1 - Pt = 1 - 0.0764 = 0.9236$$

Donde por medio de la ecuación 4.1, la eficiencia fraccional se calcula como

$$\eta_{\text{fraccional}} = \eta_j \cdot m_j = 0.92 \cdot 35\% = 32.32\% \rightarrow \eta_{\text{fraccional}}$$

De manera similar se procede con los rangos de tamaño de partícula restantes, con la diferencia de que para partículas menores a 5 μm se utilizará la ecuación 4.8 para el cálculo de la penetración; en ese rango no se requiere calcular el parámetro de impacto K_p pues la penetración es función de la caída de presión que para las dimensiones dadas, y según los cálculos que se hacen mas adelante, su valor es 6.88 in H_2O .

Es decir la penetración resulta para esos rangos de tamaño:

$$P_t = 3.47 \cdot (6.88)^{-1.43} = 0.2198$$

Los resultados se presentan en la tabla 29, en la cual se puede ver que el lavador de partículas tendrá una eficiencia global η_o de 84.63%, que es superior al valor requerido según los cálculos realizados en el capítulo 1.

TABLA 29
EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL LAVADOR DE PARTÍCULAS

Eficiencia de colección						
Rango (μm)	d_{pm} (μm)	m (%)	Kp	Pt	η	$\eta_j \cdot m_j$
0 – 0.625	0.3125	31.1	-	0.2198	0.7802	24.2655
0.625 – 1	0.8125	4.3	-	0.2198	0.7802	3.3550
1 – 2.5	1.75	7.9	-	0.2198	0.7802	6.1639
2.5 – 5	3.75	8.7	-	0.2198	0.7802	6.7881
5 – 10	7.5	13	111.86	0.0973	0.9027	11.7348
10 – 100	55	35	6015.45	0.0764	0.9236	32.3272
					$\eta_o =$	84.63

Por lo cual la carga de partículas en los gases a la salida del lavador será:

$$C_o = C_i \cdot (1 - 0.846)$$

$$C_o = 148.94 \text{ mg/scm} \cdot 0.154$$

→ $C_o = 22.93 \text{ mg/scm}$ (concentración de partículas a la salida del lavador Venturi)

4.3.3 Separación del líquido de lavado

Es común que en un lavador de partículas, tipo Venturi, las gotas del líquido de lavado sean arrastradas junto con la corriente gaseosa que se quiere limpiar. Esto producirá una disminución en la eficiencia de remoción calculada, pues las gotas que viajen junto con el gas estarán cargadas con el material particulado que se quería remover.

Para solucionar este problema usualmente se debe diseñar, junto con el lavador Venturi, una cámara de separación del líquido de lavado; para ello se puede utilizar la misma configuración e inclusive las mismas ecuaciones que en un ciclón. También es posible eliminar el arrastre del líquido utilizando cierto tipo de rellenos conocidos como “eliminadores de niebla”, los cuales son baffles o mallas especialmente diseñadas para producir el impacto de las pequeñas gotas en

superficies que desvían el flujo, produciendo así la separación del líquido que ha sido arrastrado.

Debido a lo anteriormente expuesto y en vista de que el sistema de remoción de contaminantes incluye una torre de absorción con relleno, consideramos que no es necesario diseñar un separador del líquido de lavado, pues el mismo relleno de la torre de absorción servirá para eliminar el arrastre de las gotas de agua. De hecho, el relleno servirá como medio para captar las partículas, por lo que a la salida de la torre de absorción habrá una ausencia casi total del material particulado que se quería remover. Existen ciertas razones para no utilizar directamente el relleno como medio para la remoción de material particulado, la principal razón es que se podría obstruir el flujo debido a la acumulación de suciedad.

Adicionalmente, el líquido de lavado será separado en su mayor parte al final del lavador Venturi, siendo enviado al tanque de recirculación de la cámara de enfriamiento, que como ya se dijo, servirá también de reservorio para el líquido utilizado en el Venturi. Los detalles son mostrados en la sección planos (planos 12, 13 y 15).

4.3.4 Caída de presión

Para hallar la caída de presión a través del dispositivo, primero evaluamos el número de Reynolds en función del diámetro promedio de las gotas del líquido de lavado

$$Re_D = \frac{\rho_G \cdot V_G \cdot d_d}{\mu_G}$$

$$Re_D = \frac{1.03 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \cdot 4600 \text{ cm/s} \cdot 125.99 \times 10^{-4} \text{ cm}}{2.04 \times 10^{-4} \text{ P}}$$

$$\rightarrow Re_D = 292.62$$

Por lo tanto el coeficiente de arrastre para las gotas es

$$C_D = \frac{24}{292.62} + \frac{4}{292.62^{1/3}}$$

$$\rightarrow C_D = 0.684$$

Con el valor anterior, es posible calcular la longitud óptima de la garganta de la manera siguiente

$$l_t = \frac{2 \cdot 125.99 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot 0.98 \text{ g/cm}^3}{0.684 \cdot 1.03 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3}$$

$$\rightarrow l_t = 35.02 \text{ cm}$$

Finalmente la caída de presión a través del dispositivo, se determina por medio de las ecuaciones 4.10 y 4.9

$$X = \frac{3 \cdot 35.02 \text{ cm} \cdot 0.684 \cdot 1.03 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3}{16 \cdot 125.99 \times 10^{-4} \cdot 0.98 \text{ g/cm}^3} + 1$$

$$\rightarrow X = 1.375$$

$$\Delta P = 2 \cdot 0.98 \text{ g/cm}^3 \cdot (4600 \text{ cm/s})^2 \cdot \left(\frac{1.21 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{0.118 \text{ m}^3/\text{s}} \right) \cdot \left(-1.375^2 + \sqrt{1.375^4 - 1.375^2} \right)$$

$$\Delta P = 17217.46 \text{ dinas / cm}^2$$

$$\Delta P = 6.88 \text{ in H}_2\text{O}$$

$$\rightarrow \Delta P = 1721.74 \text{ Pa}$$

La caída de presión a través del dispositivo, 1721.74 Pa, es aceptable en este tipo de lavadores de partículas, por lo tanto podemos concluir que el diseño es satisfactorio.