

## **Sección 6**

# **Controles de Materia Particulada**

## Capítulo 2

# Torres de limpieza húmedas para materia particulada

Daniel C. Mussatti  
*Innovative Strategies and Economics Group*  
Grupo de Estrategias Innovadoras y Economía  
*Air Quality Strategies and Standards Division*  
División de Normas y Estrategias de la Calidad del Aire  
*Office of Air Quality Planning and Standards*  
Oficina de Normas y Planeación de la Calidad del Aire  
*U.S. Environmental Protection Agency*  
Agencia para la Protección Ambiental de los EE. UU.  
Research Triangle Park, NC 27711

Paula Hemmer  
E.H. Pechan & Associates, Inc.  
3622 Lyckan Parkway, Suite 2002  
Durham, NC 27707

15 de Julio del 2002

## Contenido

2.1	Introducción .....	2-4
2.2	Descripción del proceso .....	2-5
2.2.1	Mecanismos de captura .....	2-5
2.2.2	Tipos de torres de limpieza .....	2-5
2.2.2.1	Torres de aspersión .....	2-5
2.2.2.2	Torre de aspersión ciclónica .....	2-7
2.2.2.3	Torres de aspersión dinámica .....	2-7
2.2.2.4	Torres de bandeja .....	2-9
2.2.2.5	Torre de limpieza por venturi .....	2-9
2.2.2.6	Torre de limpieza de orificio .....	2-10
2.2.2.7	Otros diseños .....	2-11
2.3	Configuración y operación de las torres de limpieza por venturi .....	2-12
2.3.1	Sistema de almacenamiento y distribución de líquido .....	2-12
2.3.2	Sistemas de inyección de líquido .....	2-14
2.3.3	Sección de la garganta del venturi .....	2-15
2.3.4	Cámara de recolección y eliminador de rocío .....	2-16
2.3.5	Recolección y disposición del líquido residual .....	2-17
2.3.7	Equipo auxiliar .....	2-17
2.4	Parámetros de diseño .....	2-18
2.4.1	Funcionamiento del sistema .....	2-18
2.4.1.1	Relación líquido-a-gas .....	2-18
2.4.1.2	Velocidad y caída de presión .....	2-19
2.4.1.3	Carga y distribución de tamaño de partícula .....	2-19
2.4.1.4	Razón de flujo, temperatura y humedad del gas residual .....	2-20
2.4.1.5	Tiempo de residencia .....	2-21
2.4.1.6	Tamaño de la gota .....	2-22
2.5	Diseño del sistema .....	2-22
2.5.1	Carga y distribución de la MP .....	2-22
2.5.2	Eficiencia de recolección .....	2-23
2.5.3	Propiedades del gas residual .....	2-25
2.5.3.1	Tabla psicrométrica .....	2-27

2.5.4	Diseño de la torre de limpieza .....	2-29
2.5.4.1	Estimación de la caída de presión .....	2-30
2.5.4.2	Velocidad y área de la sección transversal de la torre de limpieza .....	2-39
2.5.5	Consumibles .....	2-40
2.5.5.1	Consumo de agua .....	2-40
2.5.5.2	Consumo de electricidad .....	2-42
2.6	Análisis de costos .....	2-43
2.6.1	Inversión de capital total .....	2-43
2.6.1.1	Costos de equipo comprado .....	2-43
2.6.1.2	Costos directos e indirectos de instalación .....	2-48
2.6.2	Costos anuales .....	2-49
2.6.2.1	Costos directos anuales .....	2-49
2.6.2.2	Costos indirectos anuales .....	2-50
2.7	Problema de ejemplo .....	2-52
2.8	Reconocimientos .....	2-58
Referencias	.....	2-59

## 2.1 Introducción

Materia particulada (MP) es el término general utilizado para una mezcla de partículas sólidas y de pequeñas gotas líquidas suspendidas en el aire. La Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (*U.S. EPA*), define  $MP_{10}$ , como la materia particulada que tiene un diámetro aerodinámico nominal de 10 micras ( $\mu\text{m}$ ) o menos. Se define  $MP_{2.5}$  como la MP con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5  $\mu\text{m}$ . En general, “MP gruesa” se refiere a  $MP_{10}$  mientras que MP “fina” se refiere a  $MP_{2.5}$ .

Una torre de limpieza húmeda es un dispositivo de control de la contaminación del aire que remueve MP y gases ácidos de las corrientes de gases residuales de fuentes fijas. Los contaminantes son removidos principalmente a través del impacto, difusión, intercepción y/o absorción del contaminante sobre pequeñas gotas de líquido. El líquido conteniendo al contaminante, es a su vez recolectado para su disposición. Hay numerosos tipos de torres de limpieza húmedas las cuales remueven tanto el gas ácido como la MP. En este capítulo se discute el diseño y el costo de las torres de limpieza húmedas para el control de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ . (Véase la Sección 5.2, Capítulo 1, para información sobre las torres de limpieza húmedas para el control de gas ácido.)

Las eficiencias de recolección de las torres de limpieza húmedas varían con la distribución del tamaño de partícula de la corriente del gas residual. En general, la eficiencia de control disminuye a medida que el tamaño de la MP disminuye. Las eficiencias de recolección también varían con el tipo de torre de limpieza utilizada. Las eficiencias de control varían desde más del 99% en torres de limpieza por venturi hasta 40-60% (o menores) en torres de aspersión sencillas [1]. Las mejoras en el diseño de las torres de limpieza húmedas han aumentado las eficiencias de control en el rango submicrométrico.

Los sistemas de torres de limpieza húmedas tienen ciertas ventajas sobre los precipitadores electrostáticos (PESs) y las casas de bolsas. Las torres de limpieza húmedas son más pequeñas y compactas que las casas de bolsas o los PESs. Tienen costos de capital más bajo y costos equiparables de operación y mantenimiento (OyM). Las torres de limpieza húmedas son particularmente útiles en la remoción de MP con las siguientes características:

- Material pegajoso y/o higroscópico (materiales que absorben agua fácilmente);
- Materiales combustibles, corrosivos y explosivos;
- Partículas que son difíciles de remover en su forma seca;
- MP en presencia de gases solubles; y
- MP en las corrientes de gases residuales con alto contenido de humedad.

Las torres de limpieza húmedas tienen numerosas aplicaciones industriales incluyendo calderas industriales, incineradores, procesadores de metales, producción de sustancias químicas, producción de asfalto y producción de fertilizantes.

La desventaja principal de las torres de limpieza húmedas es que la mayor eficiencia de control se logra a expensas de una mayor caída de presión a través del sistema de control[2]. Otra desventaja es que están limitadas a temperaturas y razones de flujo de gas residual más bajas que en los PESs o en las casas de bolsas. Los diseños actuales de las torres de limpieza húmedas aceptan razones de flujo de aire de más de 47 metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) (100,000 pies cúbicos reales por minuto -*actual cubic feet per minute (acfm)*) y temperaturas de hasta  $400^\circ\text{C}$  ( $750^\circ\text{F}$ ). Otra desventaja es que generan residuos en forma de lodo, el cual requiere tratamiento y/o disposición. Por último, pueden resultar problemas de corrosión corriente abajo o de visibilidad de pluma, a menos que la humedad añadida sea removida de la corriente de gas.

## 2.2 Descripción del proceso

En esta sección se presentan los diseños de torres de limpieza húmedas utilizadas para el control de  $\text{MP}_{10}$  y  $\text{MP}_{2.5}$  emitidas por fuentes fijas. Se discuten solamente los diseños comúnmente aplicados.

### 2.2.1 Mecanismos de captura

La materia particulada hace contacto con las pequeñas gotas de líquido en las torres de limpieza húmedas a través de varios mecanismos. El impacto es el principal mecanismo de captura. Cuando el gas residual se aproxima a una gota de agua, éste fluye a lo largo de las líneas de corriente alrededor de la gota. Las partículas con suficiente inercia mantienen su trayectoria de flujo y se impactan con la gota. Debido a su masa, las partículas con diámetros mayores de  $10\ \mu\text{m}$  son generalmente recolectadas por impacto[3]. El flujo turbulento aumenta la captura por impacto.

Las partículas dominadas por las fuerzas de arrastre del fluido siguen la corriente del gas residual. Sin embargo, las partículas que pasan suficientemente cerca de una gota de agua son capturadas por intercepción; captura debida a la tensión superficial de la gota. Las partículas de aproximadamente  $1.0$  a  $0.1\ \mu\text{m}$  de diámetro son sujetas a intercepción [21]. Aumentando la densidad de las gotas en la aspersión, se aumenta la intercepción [1].

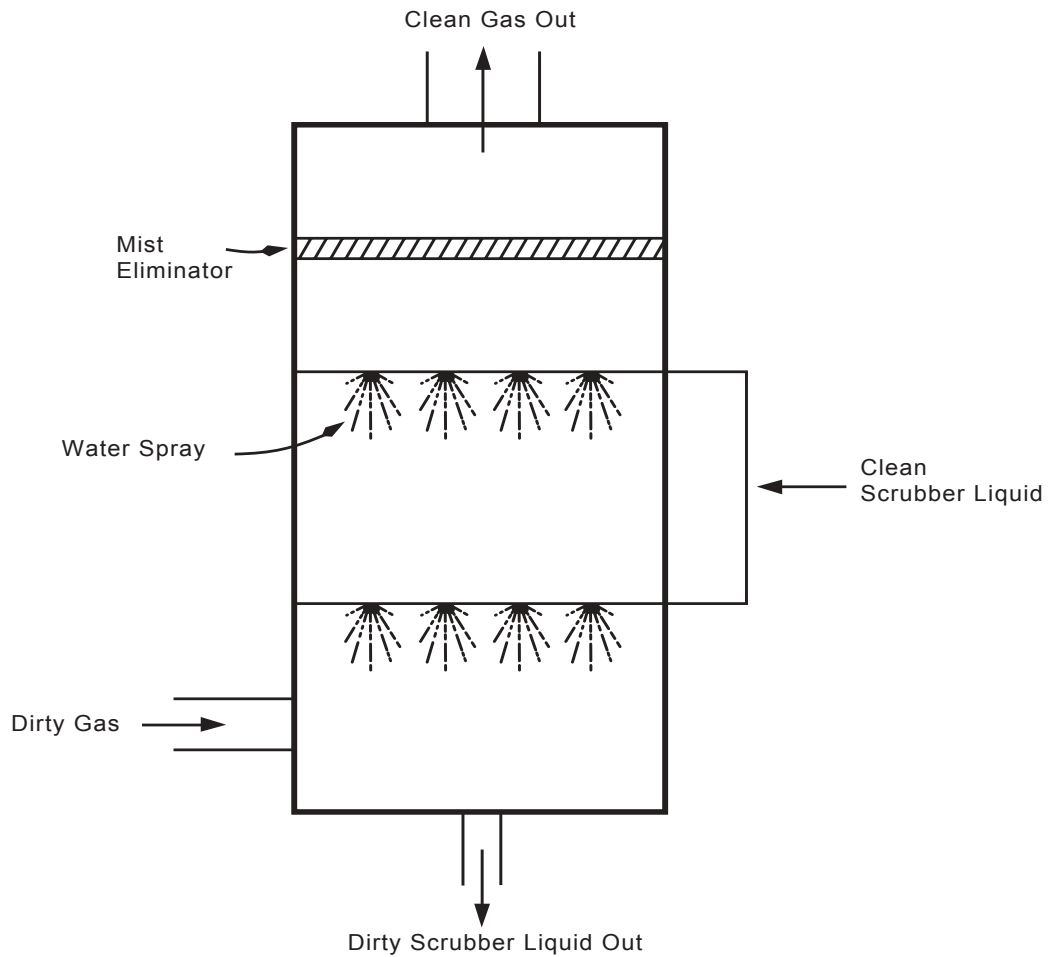
Las partículas de tamaño muy pequeño están sujetas al movimiento Browniano; movimiento irregular causado por colisiones aleatorias con moléculas de gas. Estas partículas son capturadas por las gotas de agua a medida que se difunden a través del gas residual. La recolección debida a la difusión es más importante para partículas menores de  $0.5\ \mu\text{m}$  de diámetro [1].

Los mecanismos de captura que se utilizan con menos frecuencia incluyen la condensación y la electrostática. En la limpieza por condensación, se satura una corriente de gas con vapor de agua y se captura la partícula cuando el agua se condensa sobre la partícula [3]. En la limpieza electrostática, se aumenta el contacto colocando una carga electrostática en la partícula, en la gota o en ambas [2].

## **2.2.2 Tipos de torres de limpieza**

### **2.2.2.1 Torres de aspersión**

El tipo más simple de torres de limpieza es la torre de aspersión. En una torre de aspersión, el aire cargado de materia particulada entra a una cámara donde hace contacto con el vapor de agua producido por boquillas de aspersión. Las torres pueden colocarse tanto en la trayectoria vertical como en la horizontal del flujo de gas residual. La aspersión del líquido puede dirigirse en contra del flujo del gas, en la misma dirección del flujo del gas, o perpendicular al flujo de gas. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de una cámara de aspersión vertical a contra corriente. El flujo de gas entra al fondo de la torre y fluye hacia arriba. El agua es asperjada hacia abajo desde las boquillas montadas en las paredes de la torre o montadas en un arreglo al centro de la torre. Las pequeñas gotas de agua capturan las partículas suspendidas en el flujo de gas por medio de impacto, intercepción y difusión. Las gotas lo suficientemente grandes para caer por gravedad, se recolectan al fondo de la cámara. Las gotas que permanecen atrapadas en el flujo del gas son recolectadas en un eliminador de rocío corriente arriba de las boquillas [2]. (En la sección 2.3.4 se discuten los eliminadores de rocío con más detalle)



**Figura 2.1:** Torre de aspersión [4]

Las torres de aspersión dependen principalmente de la recolección de partículas por impacto; por lo tanto, tienen eficiencias de recolección altas para MP gruesa. Las eficiencias de remoción típicas para una torre de aspersión pueden ser tan altas como 90% para partículas de más de  $5\ \mu\text{m}$ . Las eficiencia de remoción para partículas de 3 a  $5\ \mu\text{m}$  de diámetro varían de 60 a 80%. Por debajo de  $3\ \mu\text{m}$ , las eficiencias de remoción declinan a menos de 50%. Las aplicaciones de las torres de aspersión incluyen el control de emisiones de MP de operaciones de molienda, operaciones con pigmentos y control de polvo en plantas de fertilizante. Las torres de aspersión también pueden ser empleadas para el control de MP en secadores de agregados en las plantas de asfalto [1].

Las torres de aspersión tienen costos de capital más bajos que las otras torres de limpieza húmedas. Además, las torres de aspersión tienen generalmente un consumo menor de electricidad



y no son propensas al ensuciamiento, de manera que su costo de operación también es más bajo[5]. Los costos de operación de las torres de aspersión aumentan en aplicaciones para MP fina, porque dichos sistemas requieren de una razón de líquido a gas altas (más de 20 galones por 1000 pies cúbicos (gal/1000 ft<sup>3</sup>)). Los flujos de gas típicos para torres de aspersión son de 1 a 47 m<sup>3</sup>/s estándar (1,500 a 100,000 pies cúbicos estándar por minuto - *standard cubic feet per minute (scfm)*) [6].

#### 2.2.2.2 Torre de aspersión ciclónica

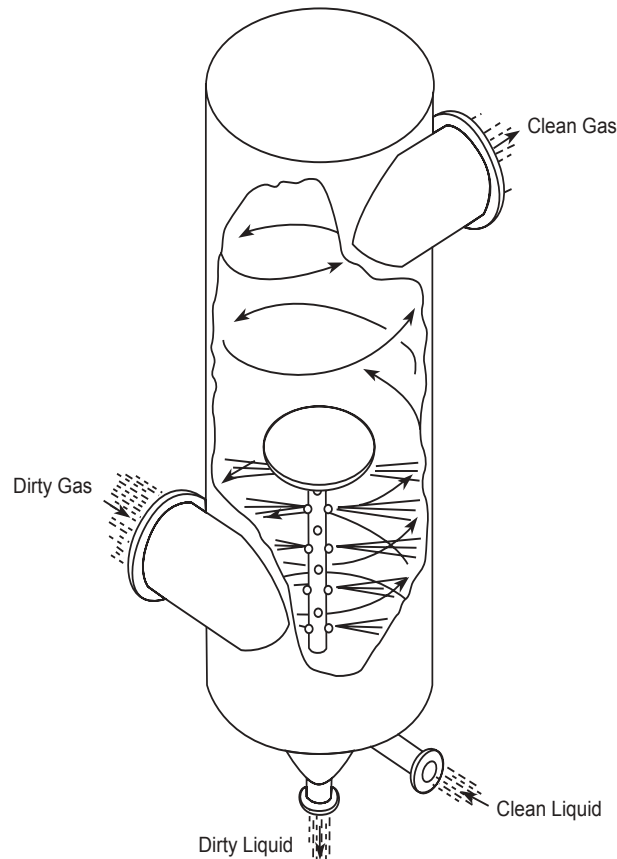
La torre de aspersión ciclónica difiere del diseño de la torre de aspersión en que la corriente del gas residual fluye a través de la cámara en un movimiento ciclónico. El movimiento ciclónico es producido al posicionar la entrada del gas tangencial a la pared de la cámara limpiadora o al colocar aspas giratorias dentro de la cámara de limpieza. La entrada del gas es ahusada, de manera que su velocidad aumenta a medida que entra en la torre. El líquido limpiador es rociado desde unas boquillas en una tubería central (de entrada tangencial) o desde la parte superior de la torre (aspas giratorias) [1]. En la Figura 2.2 se muestra un diagrama de una torre de aspersión ciclónica con una entrada tangencial [4]. Las gotas de líquido atrapadas en la corriente de gas experimentan una fuerza centrífuga que resulta del movimiento rotatorio de la corriente de gas, causando que migren hacia las paredes de la torre[2]. Las gotas se impactan contra la pared de la torre y caen al fondo de la misma. Las gotas que permanecen atrapadas en el gas residual pueden ser removidas con un eliminador de rocío.

Las torres de aspersión ciclónicas tienen eficiencias de recolección más altas que las torres de aspersión sencillas debido a la mayor velocidad relativa entre las gotas y el gas residual en una torre ciclónica. Las eficiencias de recolección para este tipo de limpiadores son tan altas como de 95% para partículas mayores de 5 µm y de 60% a 75% para partículas submicrométricas. Las aplicaciones típicas son para el control de polvo en plantas de fertilizante, operaciones de molienda y en las fundidoras [1]. Las razones de flujo de gas varían de 1 a 47 m<sup>3</sup>/s (1,500 a 100,000 pies cúbicos estándar por minuto (*scfm*)) y el suministro de potencia para un limpiador ciclónico es generalmente de 1 a 3.5 caballos de fuerza por 1000 pies cúbicos por minuto (*hp/1000 cfm -horse power per 1000 cubic foot per minute*) [2, 6]. Los costos de capital y de operación y mantenimiento son ligeramente más altos en las torres de aspersión ciclónicas debido a su diseño más complejo.

#### 2.2.2.3 Torre de limpieza dinámica

Las torres de limpieza dinámica se conocen también como torres de limpieza asistidas mecánicamente o desintegradores. Este tipo de torre de limpieza es similar a las torres de aspersión, pero con la adición de un rotor impulsado por electricidad que corta el líquido limpiador en gotas finamente dispersas. El rotor puede colocarse dentro o fuera de la torre, conectado por un

conducto. Un eliminador de rocío o un separador ciclónico remueven el líquido y la MP capturada. La mayoría de los sistemas de limpieza dinámicos humidifican el gas residual corriente arriba del rotor para reducir la evaporación y la deposición de partículas en el área del rotor [1].



**Figura 2.2:** Torre de limpieza de aspersión ciclónica [3]

Las torres de aspersión dinámicas remueven eficientemente la MP fina, pero la adición de un rotor al sistema de limpieza aumenta los costos de mantenimiento. La MP grande desgasta los rotores y la corriente de gas húmeda los corroe. En ocasiones, un dispositivo de pre-tratamiento, tal como un ciclón, precede a una torre de limpieza dinámica para remover la MP grande del flujo de gas residual [6]. El consumo de electricidad también es alto en este tipo de torres de limpieza, de 4 a 10 kilowatts (kW) por 1000 *acfm* [6, 7]. Las torres de limpieza dinámicas generalmente pueden tratar razones de flujo de gas entre 1,000 y 50,000 *scfm*. Las eficiencias de recolección para las torres de limpieza dinámicas son similares a aquellas de las torres de limpieza de aspersión

ciclónica [1]. Los costos de capital y los de operación y mantenimiento (OyM), son moderadamente más altos que los costos de las torres de aspersion sencillas debido al rotor.

#### 2.2.2.4 Torres de bandejas

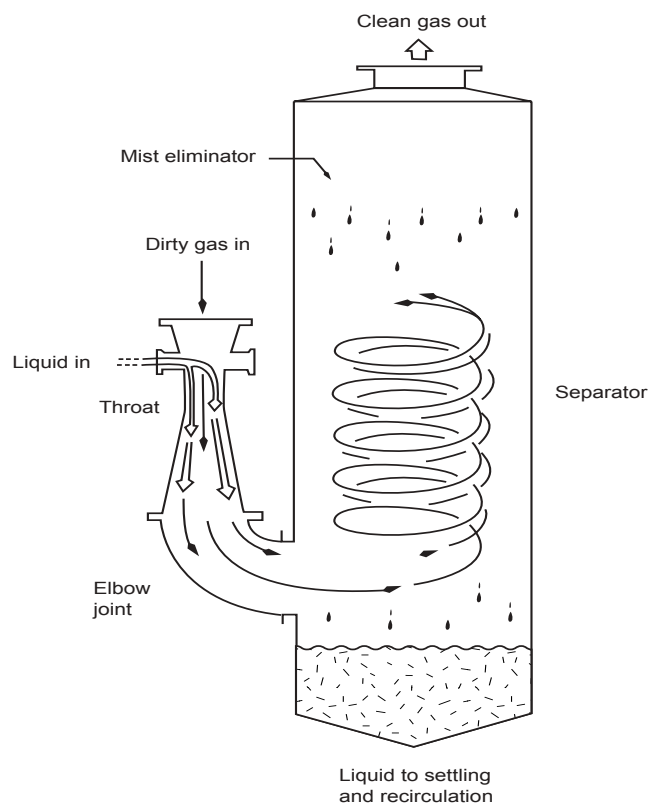
Las torres de limpieza de bandejas consisten de una torre vertical con varias bandejas perforadas montadas horizontalmente dentro de la torre. El gas entra a la torre por el fondo y viaja hacia arriba a través de orificios en las bandejas, mientras que el líquido limpiador fluye desde arriba y a través de cada bandeja. El gas se mezcla con el líquido que fluye sobre las bandejas, proporcionándose más contacto gas-líquido que en los diseños de las torres de aspersion. La velocidad del gas previene que el líquido fluya hacia abajo a través de las perforaciones en la bandeja. Las bandejas de impacto se lavan continuamente para limpiarlas de las partículas recolectadas por el líquido que fluye. Las torres de bandejas están diseñadas para permitir acceso a cada una de las bandejas para limpieza y mantenimiento[6]. La MP grande puede tapan las perforaciones, por lo tanto, algunos diseños colocan deflectores de impacto corriente arriba de cada perforación para remover la MP grande antes de que el gas residual entre por la abertura [6]. A este tipo de torre de bandeja se le refiere como torre de limpieza de bandeja de impacto o torre de limpieza de impacto.

Las torres de bandejas no remueven efectivamente las partículas submicrométricas, sin embargo, son posibles eficiencias de recolección de 97% para partículas de más de 5  $\mu\text{m}$  [5]. Las torres de bandejas también remueven eficazmente los gases solubles; por lo tanto son útiles cuando se debe remover materia particulada y gases contaminantes. Las aplicaciones típicas incluyen los hornos para cal, calderas que queman bagazo y cortezas y las industrias de metales secundarios [1, 6]. Las razones de flujo de gas para los diseños de torres de bandejas están generalmente entre 1,000 y 75,000 *scfm*. La relación de líquido a gas es baja comparada con la de las torres de aspersion y las torres de limpieza por venturi, porque el líquido de limpieza está esencialmente estático [1]. Los costos de capital y de OyM de las torres de bandejas y de impacto son moderadamente más altos que los de las torres de aspersion sencillas.

#### 2.2.2.5 Torres de limpieza por venturi

Una torre de limpieza por venturi tiene un canal de flujo “convergente y divergente”. En este tipo de sistema el área de la sección transversal del canal disminuye y luego aumenta a lo largo del canal. En la Figura 2.3 se presenta una torre de limpieza por venturi. Al área más angosta se le refiere como la “garganta”. En la sección convergente, la disminución del área causa que la velocidad del gas residual y la turbulencia aumenten. El líquido de limpieza es inyectado dentro de la torre de limpieza ligeramente corriente arriba de la garganta o directamente en la sección de la garganta. El líquido limpiador es atomizado por la turbulencia en la garganta, mejorando el contacto gas-líquido. La mezcla gas-líquido se desacelera a medida que se mueve a través de la sección divergente, causando impactos adicionales de partículas y gotas de agua y la aglomeración de las gotas. Las gotas de líquido son entonces separadas de la corriente de gas en una sección de arrastre, que típicamente consiste de un separador ciclónico y un eliminador de rocío [3]. El diseño, la operación y el costo de las torres de limpieza por venturi son el enfoque de este capítulo y se discuten con más detalle en la Sección 2.3.

Las torres de limpieza por venturi son más costosas que las torres de aspersion ciclónicas o que las torres de limpieza de bandejas, pero las eficiencias de recolección de MP fina son más altas. Las altas velocidades del gas y la turbulencia en la garganta del venturi resulta en altas eficiencias de recolección, fluctuando desde 70% hasta 99% para partículas mayores a  $1\ \mu\text{m}$  de diámetro y más de 50% para partículas submicrométricas [1,6]. Al aumentar la caída de presión en una torre de limpieza por venturi, aumenta la eficiencia, pero la demanda de energía del sistema también aumenta dando lugar a costos operacionales más altos. Los costos de capital y los de OyM son moderadamente más altos que los costos de torres de limpieza de aspersion sencillas.



**Figura 2.3:** Torre de Limpieza por venturi con separador de ciclón y eliminador de rocío[3]

#### 2.2.2.6 Torres de limpieza de orificio

En una torre de limpieza de orificio, también conocida como torre de limpieza por impacto, la corriente de gas fluye sobre la superficie de un líquido de limpieza. A medida que el gas se impacta sobre la superficie del agua, arrastra pequeñas gotas de líquido. El gas residual fluye

entonces hacia arriba y entra en un orificio con una abertura más angosta que la del conducto. El orificio induce turbulencia en el flujo, lo cual atomiza las gotas arrastradas. Las gotas atomizadas capturan la MP de la corriente del gas. Una serie de deflectores remueven entonces a las gotas, las cuales caen en la superficie del líquido que está abajo. Algunas torres de limpieza de orificio tienen orificios ajustables para controlar la velocidad del gas. Las torres de limpieza de orificio pueden manejar razones de flujo de gas de hasta 50,000 *scfm* y cargas de partículas de hasta 23 g/m<sup>3</sup> (10 granos por pie cúbico estándar)). La ventaja principal de este tipo de torres de limpieza es la eliminación de una bomba de recirculación para el líquido limpiador, la cual contribuye bastante a los costos operacionales en la mayoría de los diseños de torres de limpieza [6]. La desventaja principal es la dificultad de remover el lodo residual. En la mayoría de los diseños de torres de limpieza, el residuo se descarga continuamente por el fondo de la torre. Las torres de limpieza de orificio emplean una superficie estática de líquido limpiador, de manera que el lodo residual es removido con un eyector de lodos, el cual opera como una banda transportadora. El lodo se sedimenta en el eyector, el cual lo transporta hacia afuera de la torre de limpieza [8].

Las torres de limpieza de orificio no se emplean ampliamente, pero se han utilizado en secadores, recipientes de cocción, operaciones de molienda y trituración, operaciones de recubrimientos (recubrimiento de píldoras, vidriado de cerámicas), ventilación (ventilación de silos, operaciones de descarga) y manejo de material (estaciones de transferencia, mezcla, descarga y empaque). Éste tipo de torres de limpieza puede remover efectivamente MP de más de 2 µm de diámetro, con eficiencias de control fluctuando del 80 al 99%. Aunque las torres de limpieza de orificio pueden ser diseñadas como unidades de alta energía, la mayoría son construidas para servicio de baja energía. Los costos de capital y los de OyM son significativamente más altos que los costos para torres de aspersión sencillas.

#### 2.2.2.7 Otros diseños

Las torres de limpieza empacadas son torres que contienen un lecho de material de empaque. El material de empaque proporciona una gran superficie húmeda para el contacto gas-líquido. El líquido de limpieza se introduce por la tapa de la torre y fluye hacia abajo a través del empaque, cubriendo el empaque y formando una película fina. Los materiales de empaque están disponibles en una variedad de formas, cada una con características específicas con respecto al área de superficie, la caída de presión, el peso, la resistencia a la corrosión y el costo. Las torres empacadas son usadas más frecuentemente para la adsorción de gas en lugar de la remoción de MP, porque las altas concentraciones de partículas pueden acumularse en el empaque y obstruir la torre[6]. Las torres de limpieza empacadas se discuten con más detalle en la Sección 5.2, Capítulo 1 del Manual, “Torres de Limpieza Húmedas para Gas Acido”.

En una torre de limpieza por condensación, las partículas actúan como núcleos de condensación para la formación de pequeñas gotas de agua. Primero, la corriente de gas se satura con vapor de agua. También puede inyectarse vapor para aumentar aun más la relación de humedad. La inyección de rocío de agua y/o vapor crea una condición de súper-saturación que resulta en la condensación de agua sobre las partículas en la corriente de gas. Las gotas son

removidas por un dispositivo convencional, tal como un eliminador de rocío. Las torres de limpieza por condensación pueden remover efectivamente la MP fina y tienen eficiencias de recolección por encima del 99%. Sin embargo, la torre puede remover solamente cantidades relativamente pequeñas de polvo debido a las cantidades de saturación y condensación que son capaces de mantenerse en el flujo de gas. Las torres de limpieza por condensación son generalmente destinadas a ser utilizadas corriente abajo de otra torre de limpieza que ha removido previamente las partículas mayores de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro. La limpieza por condensación es una tecnología relativamente nueva y está disponible comercialmente en forma limitada [6]. Su aplicación más frecuente es en incineradores de residuos peligrosos o de residuos biológico infecciosos.

Las torres de limpieza cargadas aumentan la remoción al colocar una carga electrostática en las gotas de agua, en las partículas o en ambas, antes de entrar a la torre. Estas torres emplean usualmente un diseño convencional, tales como una torre de aspersion. La materia particulada puede cargarse negativamente o positivamente, dándole a las gotas la carga opuesta. Los precipitadores electrostáticos (PES) húmedos son dispositivos similares, los cuales combinan un PES con un líquido en flujo para limpiar continuamente las placas electrostáticas [1].

Las torres de limpieza disponibles comercialmente emplean una amplia gama de variaciones de diseño, incluyendo varias tecnologías híbridas. Por ejemplo, unos cuantos fabricantes ofrecen torres de limpieza por venturi con múltiples gargantas. Otros fabricantes combinan las torres de limpieza húmedas con otros tipos de removedores de partículas tales como casas de bolsas ó PES.

### **2.3 Configuración y operación de las torres de limpieza por venturi**

Hay tres tipos básicos de torres de limpieza por venturi. La diferencia principal entre las configuraciones es la energía requerida para limpiar el gas residual y transportarlo a través de la unidad. En un venturi convencional, un dispositivo externo, típicamente un ventilador de tiro inducido (TI), transfiere la energía a la corriente gas-líquido. El ventilador puede ser situado corriente arriba o corriente abajo de la unidad del venturi. El diseño básico de una torre de limpieza por venturi es muy eficiente en remover la  $MP_{10}$  tanto desde un punto de vista económico como técnico. En un venturi de “chorro” o “eyector”, se inyecta un líquido a presión en la garganta. Este tipo de venturi opera con bajas caídas de presión, generalmente unas cuantas pulgadas de columna de agua. Un venturi de chorro tiene eficiencias de recolección más bajas para MP fina que un venturi convencional. Un venturi de “alta energía” proporciona una eficiencia de recolección mayor para MP fina y submicrométrica. Un sistema de alta energía utiliza un ventilador de tiro inducido grande para crear una caída de presión alta en el lado del gas, 30 pulgadas de columna de agua o mayor. Esto aumenta significativamente la velocidad del gas residual antes de entrar en la garganta y resulta en altas eficiencias de recolección. Sin embargo, los costos de capital y las necesidades de energía eléctrica son más altos para los sistemas de alta energía que para un venturi convencional.

Los sistemas de venturi pueden ser instalados en la trayectoria horizontal o vertical del flujo de gas residual. Pueden ser comprados como paquete, montadas sobre tarimas ó como unidades erguidas en el campo. Los materiales de construcción para los componentes del sistema

incluyen el acero al carbón, acero inoxidable, aleaciones duplex, plástico reforzado con fibra de vidrio o acero revestido. Las propiedades del gas residual determinan cual material es el más apropiado para una aplicación dada. Se pueden incorporar más de un tipo de material en un sistema de venturi si fuera necesario.

En la Figura 2.4 se presenta el esquema de un sistema por venturi. Los componentes básicos del sistema de una torre de limpieza por venturi son:

- sistema de almacenamiento y distribución de líquido;
- sistema de inyección de líquido;
- sección de la garganta del venturi;
- cámara de recolección con eliminador de rocío;
- sistema de recolección y disposición de líquido residual;
- instrumentación y controles; y
- equipo auxiliar.

Cada uno de éstos componentes se discuten en las siguientes secciones.

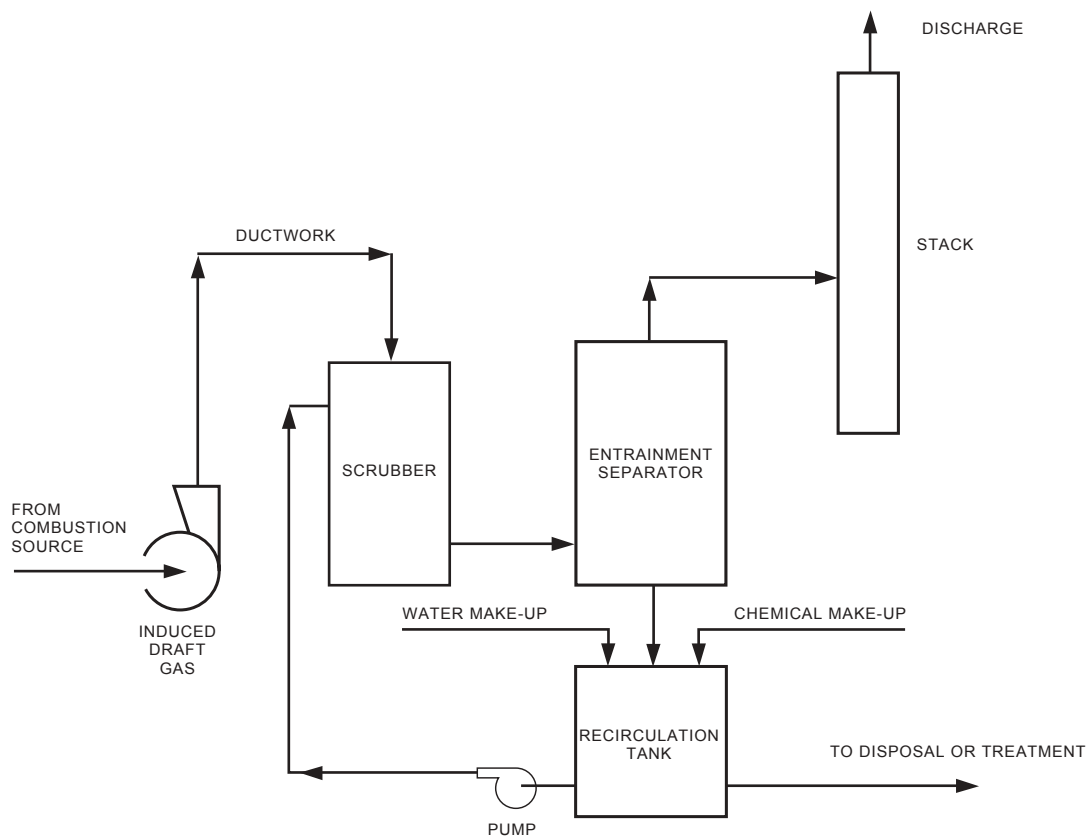
### **2.3.1 Sistema de almacenamiento y distribución de líquido**

El sistema de almacenamiento y distribución de líquido consiste de un tanque de recirculación, bomba, filtros, válvulas, tuberías, manómetros de presión y medidores de flujo. La mayoría de los sistemas están diseñados como sistemas recirculables, lo que significa que el líquido limpiador gastado es recirculado a través del sistema. Puesto que el líquido limpiador es reciclado, su contenido de sólidos aumenta a medida que se recolecta MP. La concentración de sólidos en un sistema recirculable debe mantenerse por debajo del límite de diseño o no podrán mantenerse las características. Para reducir la concentración de sólidos, se purga del sistema una porción del líquido y se agrega líquido limpiador fresco. El volumen de líquido de “reemplazo” también incluye el volumen del agua que se pierde debido a la evaporación por el gas residual caliente.

Se debe diseñar el tamaño del tanque para proporcionar operación continua y minimizar el cambio frecuente de líquido. Un sensor en el tanque monitorea el nivel del líquido. Puede incorporarse al diseño de la torre un sistema automatizado para añadir el líquido. Sin embargo, sobreestimar el tamaño del tanque y la adición del sistema automatizado de reemplazo del líquido incrementan los costos de capital y la complejidad del sistema. El incremento en los costos de capital debe ser evaluado contra el costo de OyM de operar manualmente el sistema de almacenamiento y distribución del líquido.

Los sólidos pueden removerse del líquido limpiador utilizando varios diferentes métodos. En uno de los métodos, el líquido se alimenta por gravedad hacia una serie de filtros localizados corriente arriba de la bomba para remover los sólidos. Generalmente, el filtro es construido de acero inoxidable y es removible para su limpieza y mantenimiento. Con frecuencia se incluyen en el sistema un filtro de repuesto y una serie de válvulas de segregación para facilitar la limpieza de





**Figura 2.4:** Esquema de un sistema de torre de limpieza por venturi

los filtros mientras el sistema opera. Otros métodos de remoción de sólidos incluyen los ciclones líquidos o los tanques de sedimentación.

Después de salir del tanque, el líquido de limpieza fluye hacia una bomba para aumentar la presión y la razón de flujo a los valores requeridos para la operación apropiada del sistema de venturi. Los manómetros de presión y las válvulas de flujo corriente abajo de la bomba monitorean el flujo del líquido y la operación de la bomba. Puede agregarse un sistema de control de retroalimentación para automatizar el control de la bomba.

### 2.3.2 Sistema de inyección de líquido

El diseño del sistema de inyección de líquido promueve la mezcla del gas residual y del líquido limpiador en el venturi. Existen dos sistemas básicos para inyectar el líquido limpiador en el sistema de venturi: tuberías abiertas (también conocido como el “enfoco húmedo”) y las boquillas de aspersión. Los sistemas de inyección generalmente están localizados en el conducto del gas residual, directamente corriente arriba de la sección de la garganta del venturi. En ambos sistemas,



el líquido es inyectado en la misma dirección de la corriente del gas residual. La mayoría de los sistemas de inyección son construidos de acero inoxidable o de otro material no corrosivo.

En un sistema de tuberías abiertas, varias tuberías de diámetro pequeño alimentan el líquido limpiador hacia dentro de la sección del conducto. Las tuberías inyectan el líquido tangencialmente, a lo largo de las paredes del conducto o radialmente contra placas de deflectores. El agua fluye hacia abajo, cubriendo las paredes del conducto. El sistema de tuberías se diseña de manera que toda el área de superficie de la sección es inundada con líquido de limpieza. Esto asegura que no haya una zona de transición seca/húmeda. Las áreas secas/húmedas resultan en una acumulación de sólidos en la pared del conducto que interfieren con la operación de la torre de limpieza. El gas cargado con polvo entra a la torre verticalmente desde arriba e inmediatamente golpea contra la película de agua de limpieza. Algo de separación de MP del gas residual toma lugar en ésta área. En la sección de la garganta, la corriente del gas residual se vuelve turbulenta y el líquido se rompe para formar una dispersión de pequeñas gotas. Los sistemas de tuberías abiertas tienen costos de capital y de OyM más bajos que los de boquillas de aspersión debido a su diseño más sencillo.

A los sistemas de boquillas de aspersión se les conoce a veces como “venturis de chorro” o “venturis de eyección”. Estos sistemas inyectan el líquido a través de las boquillas para crear un patrón de aspersión de gotas finas. Las gotas pueden producirse neumáticamente o hidráulicamente utilizando diseños especiales de boquillas. Aunque las boquillas de aspersión mejoran la mezcla entre el líquido y el gas residual, generalmente tienen un costo de capital y de operación más altos que los sistemas de tuberías abiertas debido a la mayor potencia requerida de la bomba para éste tipo de sistemas.

En los venturis de chorro, las boquillas pueden montarse en la pared del conducto o pueden localizarse en la sección transversal del conducto. Para áreas de garganta de más de un pie de ancho, debe localizarse una boquilla de aspersión en el centro del conducto para asegurar un contacto líquido-MP adecuado [1]. Las boquillas pueden ser construidas de acero inoxidable o de materiales más especializados tales como estelita y cerámica [9]. Debido a que las boquillas son propensas al taponamiento y a la abrasión en condiciones de cargas altas de MP, éste tipo de sistema requiere un suministro de líquido limpio para prevenir el atascamiento [6]. Las altas temperaturas y velocidades del gas pueden dañar las boquillas, consecuentemente, deben diseñarse para ser removidas para su limpieza y reemplazo. Véase a Hueman para ejemplos de boquillas y patrones de aspersión [10].

### **2.3.3 Sección de la garganta del venturi**

La garganta consiste de la porción más angosta de la sección convergente-divergente del venturi. Es aquí donde la velocidad y la turbulencia del gas residual son mayores. En la garganta, el gas residual rompe al líquido de limpieza en una distribución de alta densidad de gotas finas. Estas gotas recolectan la MP principalmente a través del impacto. El gas residual y el líquido limpiador pasan entonces a la sección divergente donde disminuye la velocidad, causando más impacto y aglomeración de líquido. Parte de la energía impartida al sistema líquido-gas es recuperada como presión de gas en la sección divergente. Sin embargo, la energía total del sistema disminuye debido a la fricción y a otras pérdidas mecánicas. Esta pérdida es medida como la disminución de

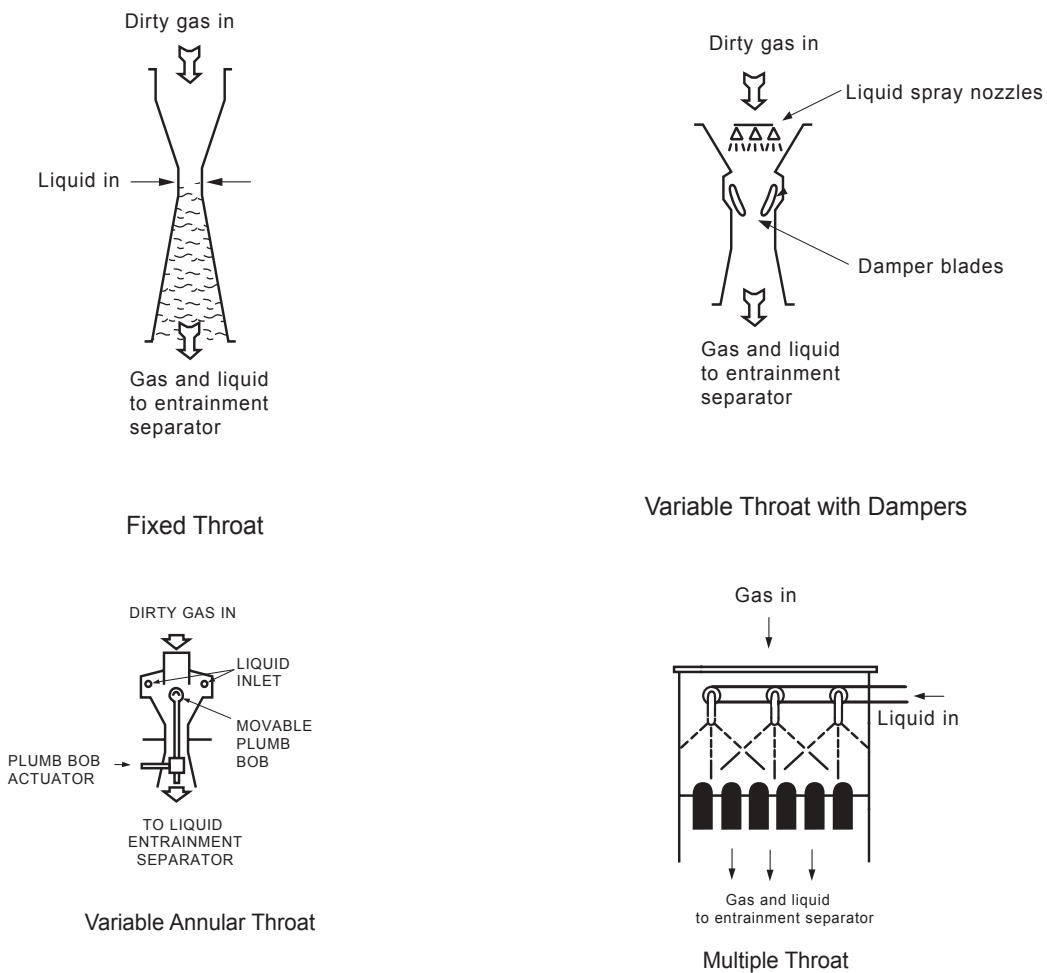
presión través de la sección convergente-divergente del venturi, referida como caída de presión,  $\Delta P$ .

Existe un número de diferentes configuraciones que están disponibles comercialmente, incluyendo la garganta fija, la garganta variable, la garganta múltiple, garganta variable anual, múltiples gargantas y de etapas múltiples. En la figura 2.5 se presenta esquemas de una garganta fija, una garganta variable con compuerta, una garganta variable anual y una garganta múltiple.

El venturi de garganta fija es el tipo más simple de venturi. La sección de la garganta puede ser circular o rectangular, dependiendo de la forma del conducto del sistema actual de gas residual. Las gargantas rectangulares están limitadas generalmente a una anchura de aproximadamente 10 in. debido a consideraciones de mezclado. Las gargantas fijas circulares son utilizadas típicamente en aplicaciones de alta presión. [1]

Un venturi de garganta variable cambia el área de sección transversal de la garganta por medio del uso de una compuerta ajustable. Hay varios diseños de compuertas incluyendo tapones cónicos, discos y cuchillas. El área de la garganta del venturi es aumentada o disminuida por las compuertas cuando cambian las condiciones del gas residual de entrada. Esto permite que el venturi mantenga la misma velocidad en la garganta y, por lo tanto, la misma eficiencia de recolección aún con fluctuaciones en las condiciones del flujo del gas residual. Puede incorporarse un sistema de control en el dispositivo de garganta variable para ajustarse automáticamente a cambios en el flujo de gas. El ajuste automático de la garganta es usado típicamente donde las condiciones de flujo varían ampliamente y se requieren ajustes frecuentes. La complejidad de una garganta variable aumenta el costo de capital y de OyM del venturi.

Un venturi de garganta múltiple es un conjunto de venturis paralelos en una sección del conducto. Las gargantas son creadas por rodillos fijos o placas planas localizadas a través de la sección transversal del conducto. El número de gargantas y su amplitud varían entre diseños. La mayoría de los sistemas tienen gargantas del orden de 1 a 2 pulgadas de ancho [1]. Las gargantas pueden diseñarse como fijas o variables. Este tipo de diseño no sólo disminuye el área de la garganta pero aumenta el área mojada por el venturi, resultando en una eficiencia de recolección más alta. Los sistemas de venturi de múltiples gargantas funcionan eficientemente en aplicaciones de baja presión.



**Figura 2.5:** Configuraciones de gargantas de venturi [9, 11]

Un venturi de múltiples etapas es simplemente una serie de torres de limpieza por venturi. Este tipo de sistema puede tener dos formas básicas. El primer tipo es un conjunto de gargantas de venturi en serie, las cuales comparten una cámara de recolección y un sistema de inyección de líquido comunes. Las gargantas están compuestas de conjuntos de aspas o deflectores dentro de una sección del conducto. El segundo tipo de venturi de múltiples etapas coloca un conjunto de

torres de limpieza por venturi individuales en series, cada uno con su propia cámara de recolección y sistema de inyección de líquido.

### **2.3.4 Cámara de recolección y eliminador de rocío**

Después de haber pasado a través de la sección del venturi, el líquido limpiador y el gas residual entran a la cámara de recolección que separa del gas residual las gotas de líquido-MP arrastradas. Una porción de gotas se asienta vía gravedad hacia el fondo de la cámara. Las gotas que permanecen arrastradas en el gas residual son removidas generalmente con un eliminador de rocío. Para drenar el residuo líquido-MP de la cámara, se coloca una salida al fondo de la cámara de recolección. La cámara de recolección puede ser un diseño de torre sencilla, una torre con deflectores interiores o un ciclón. Los diseños de deflectores y de ciclón aumentan la remoción de líquido y de MP de la corriente de gas residual usando impacto así como la gravedad. Sin embargo, resultan en caídas de presión de gas residual mayores y cuestan más que una torre sencilla.

Los eliminadores de rocío remueven entre 90% y 99% de las gotas de líquido de la corriente del gas residual [1]. Existen dos diseños básicos, los eliminadores de rocío cheveron y los de empaque de malla. Las gotas se recolectan y coalescen en las espas cheveron o en la malla. Cuando las gotas son lo suficientemente grandes, caen por gravedad o por capilaridad. Los eliminadores de rocío de empaque de malla pueden taparse con la materia particulada, por lo tanto, los diseños cheveron se aplican más frecuentemente. La caída de presión a través del eliminador de rocío es baja, de 0.5 a 1.0 pulgadas de agua (*inches of water column-in w.c.*). Todos los eliminadores de rocío requieren de lavados periódicos para remover la MP acumulada[1].

En muchos sistemas de venturi, la dirección del flujo a través de la sección del venturi es hacia abajo. Después de haber pasado a través del venturi, el flujo se torna horizontal antes de entrar a la cámara de recolección. El cambio de dirección del flujo de alta velocidad resulta en una disminución de la presión del gas residual y en abrasión de la junta del codo debido a la fricción. Para minimizar éstos efectos, varios diseños de venturi utilizan un “codo inundado”, un conducto acodado con un volumen de agua o de líquido limpiador en el fondo. El líquido en el conducto acodado disminuye la fricción y recolecta las gotas pesadas del flujo de gas residual.

### **2.3.5 Recolección y disposición del líquido residual**

El líquido limpiador gastado se drena por el fondo de la cámara hacia el tanque de recirculación. Una porción del líquido es drenada del sistema para limitar la concentración de sólidos de 20% a 30% en peso [12]. El efluente está en forma de un lodo con alto contenido de sólidos y, en algunas aplicaciones, puede contener material peligroso. El efluente no peligroso puede ser tratado en un sistema de aguas residuales existente ó por un contratista externo. El líquido es separado del residuo sólido y el agua es reusada o desechada. El sólido o el lodo remanente es confinado en rellenos sanitarios si es inerte y no es tóxico. El gas residual que contiene MP peligrosa requiere tratamiento y/o la disposición del lodo como residuo peligroso. El costo anual de la disposición de residuo peligroso es una función directa de la razón de flujo de agua residual, del contenido de sólidos suspendidos y de la naturaleza peligrosa del residuo (p.ej.

inflamable, tóxica, corrosiva, etc.). Los costos de disposición incluyen los costos de análisis de laboratorio, costos de transporte y el costo del tratamiento, destrucción, confinamiento u otros métodos de disposición. Debido a la gran variabilidad de costos de disposición, éstos costos no se incluyen como parte de los costos anuales en la Sección 2.6.2.

### **2.3.7 Equipo auxiliar**

Generalmente se requiere un ventilador de tiro inducido para compensar la pérdida de presión en un sistema de venturi de baja energía. Los ventiladores aumentan marginalmente el costo de capital del sistema de venturi pero aumentan grandemente los costos de OyM debido al uso de electricidad y a los requisitos de mantenimiento del ventilador. La demanda de potencia del ventilador varía de 3 a 12 *hp/1000 cfm* [2]. El ventilador de tiro inducido puede ser colocado ya sea corriente arriba o corriente abajo de la torre de limpieza húmeda por venturi. La colocación del ventilador depende de las características del gas residual. Por ejemplo, las aplicaciones con cargas altas de materia particulada colocan el ventilador corriente abajo para evitar que se piquen las aspas del ventilador. Para reducir la corrosión y las picaduras, el ventilador puede ser construido de acero inoxidable o recubierto con materiales especiales.

Las corrientes de gas a alta temperatura evaporan grandes cantidades de líquido limpiador, causando una disminución en el número de gotas generadas por el venturi. Por lo tanto, las aplicaciones para alta temperatura deben enfriar el gas antes de que entre al venturi o rociar un mayor volumen de agua en el venturi. El gas puede ser enfriado con un templador, el cual rocía el agua en la corriente de gas. Cuando el agua se evapora, la temperatura de la corriente de gas disminuye. Los templadores aumentan marginalmente los costos de capital y de operación y el costo de operación del sistema.

Los sistemas de venturi pueden requerir equipo adicional al ventilador y al templador. Puede requerirse un colector de MP, tal como una campana para capturar el gas residual de la fuente. Para remover la MP grande y prevenir la abrasión de los componentes del venturi, se puede requerir un dispositivo de colección corriente arriba tal como un ciclón. Puede requerirse una chimenea después del venturi para emitir el gas a la atmósfera a una determinada altura. Por último, puede requerirse un dispositivo de recalentamiento para aumentar la flotabilidad de (altura) de la pluma para una mejor dispersión y para disminuir la visibilidad de la pluma causada por la condensación del agua.

## 2.4 Parámetros de diseño

### 2.4.1 Funcionamiento del sistema

Los parámetros que afectan el funcionamiento global de una torre de limpieza húmedas son:

- Distribución de tamaño y carga de partículas;
- Razón del flujo, temperatura y humedad del gas residual;
- Velocidad del gas y caída de presión;
- Relación líquido-a-gas (L/G);
- Tamaño de la gota; y
- Tiempo de residencia.

Cada uno de éstos parámetros se discuten brevemente a continuación.

#### 2.4.1.1 Relación líquido-a-gas

La relación líquido-a-gas (L/G) es el volumen de líquido inyectado por volumen de gas residual tratado. En general, una relación L/G alta aumenta la eficiencia de recolección, ya que la densidad de las gotas a través de una sección transversal dada del venturi es más alta. Las relaciones de flujo de líquido entre 7 y 10 galones/1000 ft<sup>3</sup> resultan en el funcionamiento óptimo. Las relaciones L/G en éste rango producen eficiencias de recolección bastante constantes dada una caída de presión constante [13]. Las relaciones L/G mayores de 10 gal/1000 ft<sup>3</sup> no mejoran el funcionamiento significativamente. Mientras que el aumento de la relación L/G aumenta la eficiencia de recolección, los costos de operación también aumentan debido a un mayor uso de líquido limpiador y de la bomba.

#### 2.4.1.2 Velocidad y caída de presión

El aumentar la velocidad relativa entre el gas y las gotas de líquido aumenta el momento de la partícula, permitiendo que las partículas más pequeñas sean recolectadas por impacto. La velocidad relativa del gas residual puede aumentarse estrechando la garganta, inyectando el líquido limpiador a contra-corriente al flujo o rociando el líquido en la garganta. Sin embargo, aumentar la velocidad relativa generalmente aumenta la caída de presión, la demanda de energía y los costos operativos de la torre de limpieza [5]. Los venturis de alta energía aumentan la velocidad del gas utilizando un ventilador de tiro inducido corriente arriba del venturi. Estos sistemas tienen costos de operación más altos que los venturis de baja energía debido a una mayor potencia del ventilador.

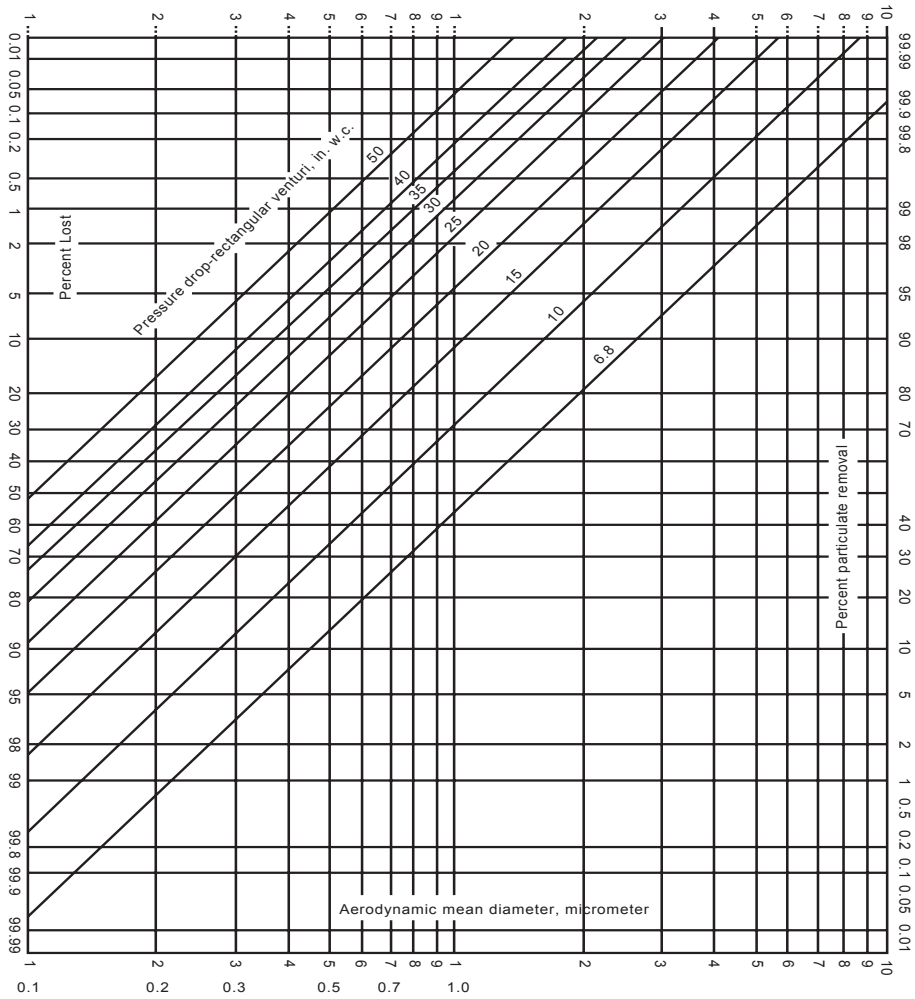
Cuanto más pequeña sea el área de la sección transversal de la garganta, más grande será el aumento obtenido en la velocidad del gas. La velocidad del gas más alta ocurre en el punto central de la sección transversal más angosta, generalmente variando de 45 a 150 metros por

segundo (m/s) (150 a 500 pies por segundo (ft/s)). La pérdida resultante de presión de la corriente de gas a través del venturi está en el rango de 10 a 80 *in w.c.* En general, el aumentar la caída de presión por encima de 45 *in w.c.* no aumenta significativamente la eficiencia de remoción en los diseños convencionales de venturi [1]. Los diseños de venturi optimizan el área transversal de la garganta para proporcionar velocidades de gas altas mientras minimizan la caída de presión. Además, la sección divergente del venturi está diseñada para recuperar la mayoría de la presión. Las secciones divergentes se diseñan para disminuir la velocidad del gas residual hasta 30 y 15 m/s (100 y 50 ft/s) [13, 24]. A esta velocidad, las pérdidas por turbulencia son minimizadas y se logra la mayor cantidad de recuperación de energía.

#### 2.4.1.3 Distribución de tamaño y carga de partículas

El funcionamiento de un determinado tipo de torre de limpieza es altamente dependiente de la distribución de tamaño de la MP en la corriente de gas. La distribución de tamaño determina el mecanismo de captura que domina; impacto, intercepción o difusión. La mayoría de los diseños de torres de limpieza húmedas dependen casi exclusivamente del impacto inercial para la recolección de partículas. Las partículas menores a 0.1  $\mu\text{m}$  son capturadas principalmente a través de mecanismos de difusión [5]. En la Figura 2.6 se presenta la eficiencia de recolección aproximada de una torre de limpieza húmeda por venturi en función del tamaño de partícula.

La carga de la MP, también llamada carga de polvo, es la masa de MP por unidad de volumen en el gas residual a la entrada a la torre de limpieza. A medida que aumenta la carga de MP, la relación L/G debe aumentar para mantener la misma eficiencia de recolección. En la Figura 2.7 se presenta L/G como una función de la carga de materia particulada. Una carga alta de MP resulta también en mayores contenidos de sólidos en el líquido reciclado en la torre. Para mantener el contenido de sólidos, debe descargarse del sistema un volumen mayor de líquido de limpieza como residuo y agregarse un mayor volumen de líquido limpio al sistema. Las cargas altas de MP aumentan los costos de operación del sistema debido al aumento en el uso de la bomba, en el consumo de líquido de limpieza y en la disposición de líquido residual. Las aplicaciones para cargas altas de MP requieren también más mantenimiento, ya que las partículas pueden causar taponamiento de los orificios y desgaste de partes tales como las boquillas y ventiladores.

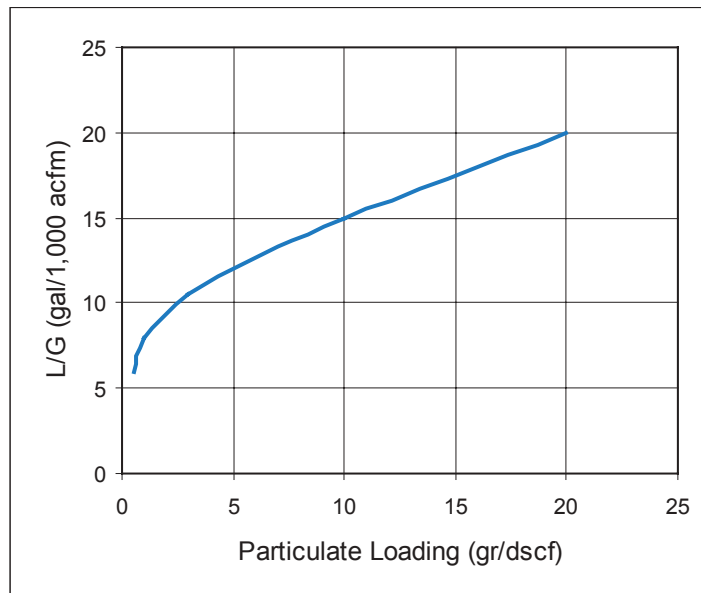


**Figura 2.6:** Eficiencias de recolección aproximadas de partículas de diámetro entre 0.1-10  $\mu\text{m}$  a caída de presión en el venturi en el rango de 6.8-50 pulgadas de  $\text{H}_2\text{O}$  [2]



#### 2.4.1.4 Razón de flujo, temperatura y humedad del gas residual

La razón del flujo del gas residual es el parámetro más importante en el diseño del tamaño de una torre de limpieza húmeda. A mayor razón de flujo del gas residual, mayores son el sistema de venturi y el volumen de líquido requeridos para tratar el gas residual. Las torres de limpieza húmedas operan a flujos de gas más bajos que las casas de bolsas o los PESs, debido a la inyección de líquido. Los venturis nuevos de baja energía pueden manejar razones de flujo de aire hasta de 95 m/s (300,000 *acfm*). Los sistema de venturi de chorros están limitados generalmente a aproximadamente 3 m/s (10,000 *acfm*) y los sistemas de múltiples gargantas y venturis de alta energía están limitados a aproximadamente 47 m<sup>3</sup>/s (150,000 *acfm*).



**Figura 2.7:** Relación de líquido a gas como una función de la carga de partículas [16]  
[22]

La temperatura y la humedad del gas residual también impactan el diseño del venturi. Cuando el aire pasa a través de la torre de limpieza húmeda, el agua se evapora, lo cual aumenta la humedad y enfría la corriente de gas. La cantidad de evaporación está determinada por la temperatura y la humedad de entrada. Las razones de evaporación altas aumentan la relación L/G requerida por el sistema. En aplicaciones para MP, las torres de limpieza húmedas están generalmente limitadas a un rango de temperatura de (50°F a 700°F) debido a la evaporación. Puede necesitarse un templador en aplicaciones para temperaturas más altas. La temperatura alta afecta el material usado para manufacturar los componentes de la torre.

#### 2.4.1.5 Tiempo de residencia

El aumentar la longitud de la garganta y de la sección divergente, aumenta el tiempo de contacto entre el líquido y la MP suspendida en el gas residual. Por ejemplo, un venturi con una garganta de longitud de 1 pie y velocidad de aproximadamente 450 ft/s tiene un tiempo de contacto de 1/450 de segundo. Esto es el tiempo mínimo para el mezclado y el contacto entre el líquido y el gas residual. Para una garganta cilíndrica, la relación de longitud de garganta a diámetro de garganta de 3:1 es la mínima recomendada [13]. Para sistemas de alta energía, se recomienda que la longitud de la sección divergente de la garganta sea de por lo menos 4 veces el ancho de la garganta para poder tener suficiente tiempo de contacto. [1]

#### 2.4.1.6 Tamaño de la gota

Hay un tamaño de gota óptimo para maximizar la recolección de MP. Las gotas más pequeñas tienen una mayor relación de área de superficie a volumen, por lo tanto, capturan más partículas por volumen de líquido inyectado. Sin embargo, si el tamaño de la gota se vuelve muy pequeño, el momento del gas residual puede ser impartido a las gotas, lo cual disminuye la velocidad relativa entre las gotas y las partículas. Una velocidad relativa más baja resulta en una eficiencia de recolección más baja. Las torres de limpieza húmedas controlan el tamaño de las gotas usando diferentes técnicas. En las torres que usan gotas pre-formadas, como las torres de aspersión, el tamaño de la gota está determinado por el tipo de boquilla y las condiciones a las que opera el sistema. En las torres de limpieza dinámicas, la velocidad del rotor y la L/G controlan el tamaño de la gota. En las torres de limpieza por venturi, el tamaño de la gota está controlado por la L/G y la velocidad del gas en la garganta.

## 2.5 Diseño del sistema

### 2.5.1 Distribución y carga de la MP

El diseño y funcionamiento de un tipo dado de torre de limpieza depende grandemente de las propiedades de la materia particulada en la corriente de gas. Tal como se discute en la Sección 2.4, las propiedades más críticas son la distribución de tamaño de partícula y la carga de MP. Hay una gran distribución del tamaño de partícula y de la carga a través de las fuentes industriales. La distribución y la carga de MP específica de la fuente determinan el dispositivo de recolección de MP más eficiente en cada caso.

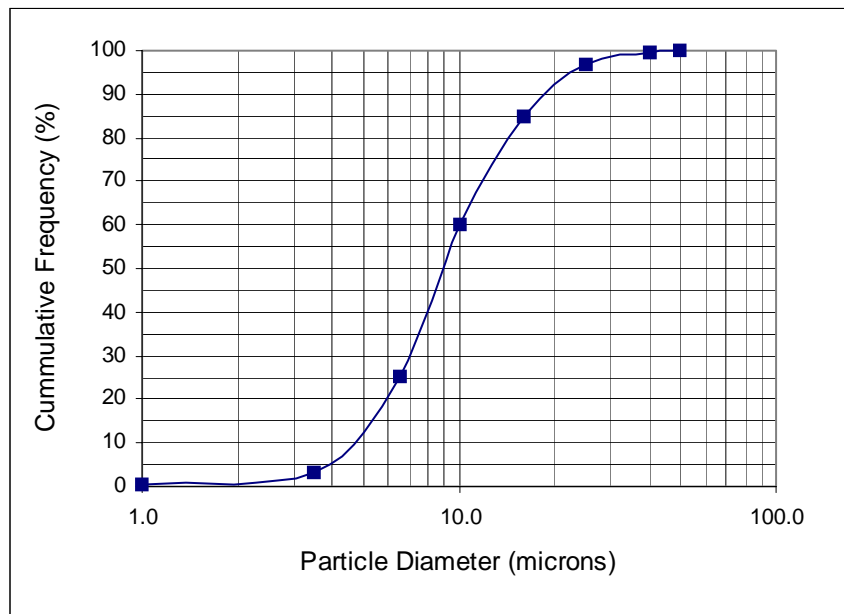
Debido a que las partículas tienen diferentes formas y densidades, el tamaño de la partícula se expresa usualmente como el diámetro aerodinámico. El diámetro aerodinámico de una partícula es el diámetro de una esfera con la densidad del agua que se asienta en aire en reposo a la misma

razón que la partícula en cuestión. La distribución del tamaño se mide usualmente usando un impactador de cascada, el cual separa las partículas por su diámetro aerodinámico en placas. Se mide la masa de las partículas en cada placa de impacto [5]. En la Figura 2.8 se presenta una distribución típica de tamaño de partícula de MP, las masa acumulativa contra el tamaño de la partícula. Nótese que es una distribución log-normal. La MP de fuentes industriales, generalmente tienen una distribución log-normal.

El diámetro geométrico medio es el diámetro aerodinámico del percentil 50 de la MP en base masa (también referido como la mediana en masa del diámetro de partícula). Por definición, la desviación estándar de una distribución log-normal es la relación del percentil 84 al percentil 50 de los tamaños de partícula en base masa:

$$\sigma = \frac{d_{84}}{d_{50}} \quad (2.1)$$

donde  $\sigma$  = desviación estándar,  
 $d_{50}$  = fracción masa del percentil 50 del tamaño de partícula, y  
 $d_{84}$  = fracción masa del percentil 84 del tamaño de partícula



**Figura 2.8:** Distribución del tamaño de partícula para una fuente de MP

## 2.5.2 Eficiencia de recolección

La eficiencia de recolección es la cantidad de MP removida de la corriente de gas por la torre de limpieza húmeda. Esta eficiencia puede ser expresada en un número de formas incluyendo la eficiencia de una sola gota de agua, la eficiencia de la torre de limpieza en base masa o la eficiencia de la torre en base al tamaño de partícula. Cada una de éstas eficiencias se define a continuación.

La eficiencia de recolección de una sola gota  $\eta_{drop}$  es definida como el área limpiada libre de partículas de aerosol dividida por el área transversal proyectada de la gota.

$$\eta_{drop} = \frac{\text{area swept free of particles}}{\text{droplet cross-sectional area}} \quad (2.2)$$

La eficiencia total de la torre de limpieza se relaciona usualmente con  $\eta_{drop}$  por una ecuación empírica exponencial. Sin embargo, la mayoría de los parámetros en la ecuación generalmente no están disponibles al nivel del estudio. Por lo tanto, en éste capítulo no se presenta éste método para determinar la eficiencia.

La eficiencia de recolección en base masa está dada por :

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_i - \dot{m}_o}{\dot{m}_i} = \frac{l_i - l_o}{l_i} \quad (2.3)$$

donde  $\eta_m$  = eficiencia de recolección total en base masa,  
 $\dot{m}_{i,o}$  = razón de flujo masa a la entrada, a la salida, y  
 $l_{i,o}$  = carga de partícula a la entrada, a la salida.

La eficiencia de recolección como una función de la distribución del tamaño de partícula es la eficiencia de recolección acumulativa para cada rango de tamaño de partícula dada por:

$$\eta_d = \sum_0^j \eta_j m_j \quad (2.4)$$

donde  $\eta_d$  = eficiencia de recolección total,  
 $\eta_j$  = eficiencia fraccional para el rango de diámetro de partícula j,  
 $m_j$  = fracción masa para el rango de diámetro de partícula j, y  
 $j$  = el número de rangos de diámetros de partícula.

La fracción masa está definida por:

$$m_j = \frac{\text{masa de las partículas en el rango de interés}}{\text{masa total}} \quad (2.4a)$$

La eficiencia de recolección en base masa es generalmente más alta que la eficiencia de recolección en base a la partícula. Esto es porque las partículas de tamaño más grande, las cuales generalmente tienen más masa, tienden a ser recolectadas a eficiencias de recolección más altas que las partículas de diámetros más pequeños. Por lo tanto, es más común el expresar la eficiencia en base al tamaño de la partícula que en base masa.

La penetración se define como la fracción de las partículas que pasan a través del dispositivo de recolección. La penetración está relacionada directamente con la eficiencia de recolección por:

$$Pt_d = 1 - \eta_d \quad (2.5)$$

donde  $Pt_d$  = penetración total del dispositivo de colección,  
 $\eta_d$  = eficiencia total en base al tamaño de la partícula.

Las ecuaciones de diseño de los dispositivos de remoción de MP utilizan frecuentemente el diámetro de corte, el diámetro al cual la eficiencia de recolección de la torre es de 50%. El diámetro de corte es una característica del dispositivo de control y de las condiciones de operación, no del rango de tamaño de partícula. Se determina experimentalmente usando la eficiencia de recolección de partícula y los datos de distribución del tamaño de las partículas recolectadas para un dispositivo y una serie de condiciones de operación dados.

### 2.5.3 Propiedades del gas residual

Generalmente se le proporcionan al proveedor las propiedades físicas y químicas del gas residual para que calcule apropiadamente el tamaño del sistema de limpieza y seleccione los materiales apropiados para su fabricación. Estas propiedades tienen un impacto directo en los costos de capital y anuales asociados con la torre de limpieza, así como en el diseño. El diseñador necesita información sobre las condiciones a la entrada y a la salida incluyendo:

$Q$  = Razón de flujo volumétrico;  
 $V$  = volumen;  
 $T$  = temperatura;  
 $P$  = presión; y  
 $\theta_{H_2O}$  = contenido fraccional de humedad.

Las propiedades del gas residual se miden a la entrada a la torre. Las propiedades del gas residual de salida cambian como una función de la razón de evaporación del líquido limpiador.

En esta discusión se usan los siguientes subíndices:

$m$  = mezcla de aire seco y vapor de agua;  
 $a$  = aire seco;  
 $wv$  = vapor de agua;

A medida que los gases de la chimenea pasan a través de la torre, una porción del agua en el líquido limpiador se evapora. La temperatura del gas de chimenea disminuye, el contenido de agua y la humedad aumentan y el volumen disminuye. Para propósitos de diseño, se supone que las condiciones del gas residual a la salida de la torre son las del punto de saturación.

La evaporación a través de la torre de limpieza es generalmente modelada como un proceso de enfriamiento por evaporación directa (también referido como un proceso de saturación adiabática). En éste proceso, el aire no saturado (seco) es enfriado al transferir el calor sensible del aire al vapor de agua como calor latente. La cantidad total de energía de calor contenida en el aire, la entalpía, se mantiene constante. Además, se supone que el sistema conserva la masa y que el gas residual se comporta como un gas ideal. Bajo estas suposiciones, la razón del flujo masa del aire seco a través del sistema se mantiene constante y la diferencia entre la masa de vapor de agua de entrada y salida es la masa evaporada en la torre de limpieza.

En esta subsección se presenta un procedimiento para estimar las condiciones del gas residual de salida y el agua evaporada en la torre de limpieza. El procedimiento utiliza una tabla psicrométrica. Las variables termodinámicas en la tabla se definen en el párrafo siguiente. Actualmente, existen programas comerciales de computadora que calculan directamente las variables en la tabla.

El contenido de humedad se refiere al volumen de vapor de agua en un determinado volumen de gas. El contenido de humedad está dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_{H_2O} = \frac{V_{wv}}{(V_a + V_{wv})} \quad (2.6)$$

La relación de humedad o la humedad absoluta es la relación de la masa del aire seco al vapor de agua:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.7)$$

donde  $\omega$  = relación de humedad

Esta es diferente a la humedad relativa, la cual es la razón de la presión parcial del vapor de agua a condiciones actuales y de saturación para una temperatura dada. La relación entre el contenido de humedad,  $\theta_{H_2O}$ , y la relación de humedad,  $\omega$ , para un gas ideal está dada como:

$$\theta_{H_2O} = \frac{\frac{\omega}{MW_a}}{\left(\frac{1}{MW_{wv}} + \frac{\omega}{MW_a}\right)} \approx \omega \frac{MW_{wv}}{MW_a} \quad (2.8)$$

donde  $MW_{wv}, MW_a$  = peso molecular del vapor de agua y del aire, respectivamente. Para usar la tabla psicrométrica, las propiedades del gas residual deben ser conocidas a condiciones estándar (o a las condiciones de la tabla, si son distintas a las estándar). Estas propiedades están determinadas a condiciones estándar usando la Ley de Gas Ideal:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2.9)$$

donde la temperatura está en unidades de grados Kelvin. Suponiendo presión constante, el volumen del gas residual a la temperatura estándar puede ser calculada como:

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} \quad \text{or} \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1} \quad (2.10)$$

donde  $Q_2$  = la razón de flujo volumétrico del gas residual que sale (aire y vapor de agua,  $Q_m$ ) a condiciones estándar.

La relación entre la masa y el volumen de un gas ideal puede calcularse a partir de su volumen a temperatura y presión estándar usando la ecuación:

$$\dot{m} = Q \frac{MW}{V_{mole}} \quad (2.11)$$

donde  $\dot{m}$  = razón de flujo masa,  
 $MW$  = peso molecular, y  
 $V_{mole}$  = volumen de una mol de aire  
 = 22.4 litros por gmol (385 ft<sup>3</sup> por lbmole).

El contenido de humedad (o relación de humedad), es usado para calcular la razón de flujo masa de aire seco y vapor de agua a la entrada usando la Ecuación 2.11:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{wv(in)} &= [Q_{m(in)} \times \theta_{H_2O(in)}] \frac{MW_{wv}}{V_{mole}} \\ \dot{m}_{a(in)} &= [Q_{m(in)} (1 - \theta_{H_2O(in)})] \frac{MW_{wv}}{V_{mole}}\end{aligned}\quad (2.12)$$

Nótese que esta es la razón de flujo masa a condiciones estándar. La relación de humedad a la entrada,  $\omega_{(in)}$  a condiciones estándar pueden ahora ser calculadas también usando la Ecuación 2.7.

### 2.5.3.1 Tabla psicrométrica

La Figura 2.9 es un ejemplo de una tabla psicrométrica en condiciones atmosféricas estándar, 14.7 libras por pulgada cuadrada (*pounds per square inch, psi*). La temperatura de bulbo seco es típicamente el eje de las x en la tabla. La temperatura de bulbo seco es la temperatura de la mezcla de gas residual de vapor de agua y aire o la temperatura medida por un termómetro ordinario. El eje de las y de la tabla tiene una escala tanto para la relación de humedad como para la humedad relativa. El eje de las y a la extrema derecha de la tabla es la curva de saturación, representando una humedad relativa de 100%. Las líneas que se curvan hacia arriba y hacia la izquierda son generalmente líneas de temperatura de bulbo húmedo constante, volumen específico y entalpía. El volumen específico de la mezcla de aire-vapor de agua o volumen húmedo, es el volumen de la mezcla por unidad de masa de aire seco.

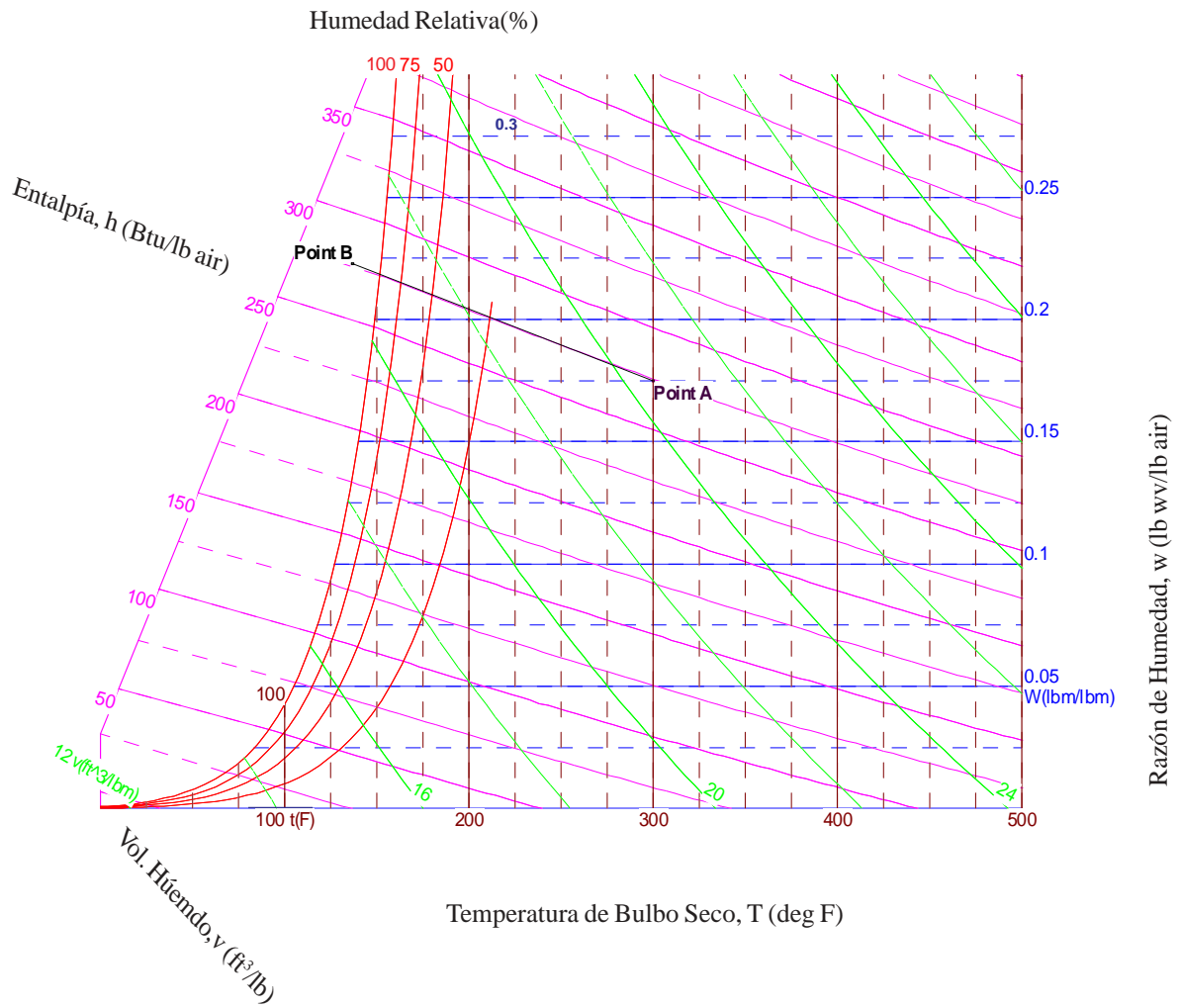
Utilice la tabla para determinar las condiciones de salida al punto de saturación. Primero, fije un punto en la tabla en base a la temperatura de bulbo seco y a la relación de humedad. Siga la línea correspondiente de entalpía constante (línea de saturación adiabática), hacia la curva de saturación a la izquierda. Este es el punto donde se leen las condiciones de salida del gas residual. Este es el punto en el cual se ha evaporado la cantidad máxima de agua de la torre hacia el gas residual. Nótese que la masa del aire seco se conserva durante el proceso,  $m_{a(in)} = m_{a(out)}$ .

La razón del flujo volumétrico del gas residual a la salida de la torre puede determinarse ahora. Usando la razón de flujo masa del aire seco y el volumen húmedo,  $v$ , lea en la tabla el volumen del aire saturado por unidad de masa de aire seco, obtenido de la tabla, la razón del flujo volumétrico es:

$$Q_{m(out)} = v \dot{m}_a \quad (2.13)$$

donde  $v$  = volumen húmedo del aire saturado





**Figura 2.9:** Tabla psicrométrica a presión estándar, 14.7 psi  
(Tabla desarrollada utilizando *Akton Psychrometrics, Akton Associates, Inc.*)

La relación de humedad de salida puede ser usada para calcular la masa de vapor de agua en el gas residual a la salida de la torre:

$$\dot{m}_{wv(out)} = \omega_{(out)} \dot{m}_a \quad (2.14)$$

Debe añadirse agua adicional al sistema de la torre de limpieza para reponer el agua perdida por evaporación. Al determinar la diferencia entre la humedad de entrada y de salida de la corriente el gas residual, puede calcularse el volumen del agua evaporada. La masa del agua evaporada a través de la torre es:

$$\dot{m}_{wv(evap)} = \dot{m}_{wv(out)} - \dot{m}_{wv(in)} \quad (2.15)$$

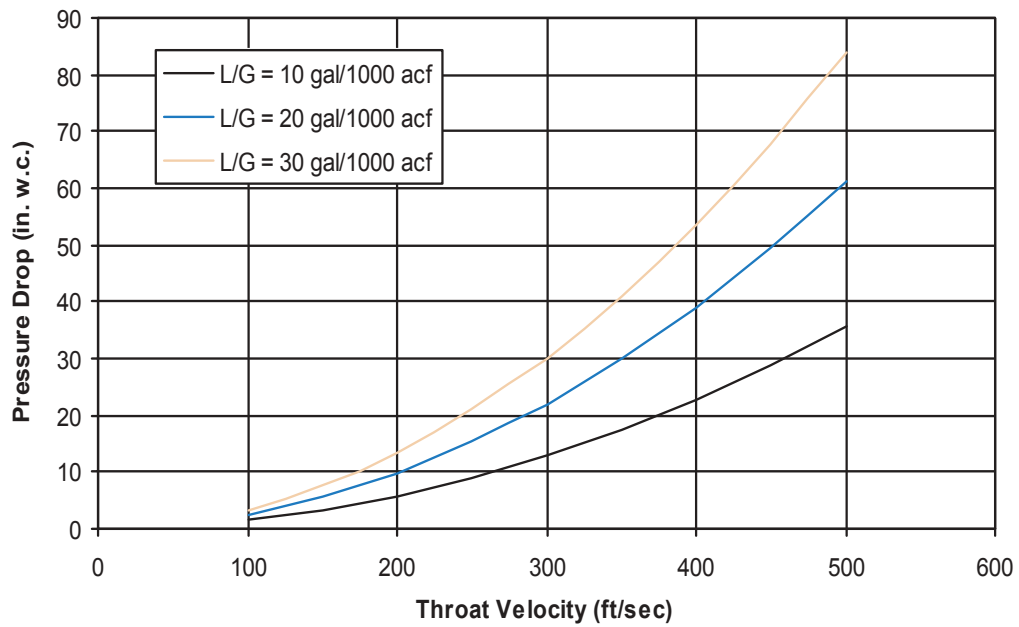
La razón de flujo del volumen de agua de repuesto está dada por:

$$Q_{wv(evap)} = \frac{\dot{m}_{wv(evap)}}{\rho_{H2O}} \quad (2.16)$$

#### 2.5.4 Diseño de la torre de limpieza

En general, los fabricantes de torres de limpieza húmedas garantizan una eficiencia de recolección para un diseño específico. Esta eficiencia de recolección depende de la relación líquido a gas, de la velocidad del gas en el venturi y de la caída de presión. La razón L/G y la caída de presión impactan el costo de O<sub>y</sub>M mientras que la velocidad del gas en el venturi impacta el costo de capital. (Véase la Sección 1 Capítulo 2 para una discusión de los costos de capital y los costos anuales.) Por lo tanto, no existe un método de diseño directo. Debe emplearse un método iterativo que visualice tanto el costo de capital como el costo anual. La relación entre L/G, la velocidad del gas en el venturi y la caída de presión se muestra en la Figura 2.10 para una torre de limpieza por venturi.

Varios investigadores han desarrollado un número de métodos para estimar los parámetros de diseño del venturi. En este capítulo se presentan cuatro de los métodos más comunes usados por los diseñadores. Para discusiones más teóricas de las ecuaciones de diseño de torres de limpieza, tales como para el cálculo de la caída de presión para un diámetro de partícula específico, véase las Referencias [1, 2, y 4]



**Figura 2.10:** Relación entre la caída de presión, la velocidad de garganta y L/G

2.5.4.1 Estimación de la caída de presión

2.5.4.1.1 Ecuaciones de caída de presión

La mayoría de las ecuaciones de caídas de presión para las torres de limpieza de venturi son de la forma:

$$\Delta P = k v^2 \rho_g \left( \frac{L}{G} \right) \tag{2.17}$$

donde

- $\Delta P$  = caída de presión a través del venturi,
- $v$  = velocidad de garganta,
- $\rho_g$  = densidad del gas,
- $\frac{L}{G}$  = relación líquido a gas, y
- $k$  = factor de correlación para un diseño específico de torre de limpieza.

Una de las ecuaciones más aceptadas para estimar la caída de presión a través de una torre de limpieza por venturi fue publicada por Calvert [24]. La caída de presión está dada por:

$$\Delta P = 5.4 \times 10^{-4} v^2 \rho_g \left( \frac{L}{G} \right) \quad (2.18)$$

donde  $\Delta P$  = caída de presión a través del venturi en pulgadas de agua (*in H<sub>2</sub>O*),  
 $v$  = velocidad de garganta en pies por segundo (ft/s),  
 $\rho_g$  = densidad de la corriente de gas saturada en libras por pie cúbico (lb/ft<sup>3</sup>), y  
 $\frac{L}{G}$  = relación líquido a gas en galones por 1000 pies cúbicos (gal/1000 ft<sup>3</sup>).

La ecuación de Calvert predice la caída de presión razonablemente bien para relaciones líquido a gas moderadas. Se ha encontrado que la ecuación funciona bien para relaciones entre 3 gal/1000 ft<sup>3</sup> y 10 gal/1000 ft<sup>3</sup>, pero por encima de 12 gal/1000 ft<sup>3</sup> la ecuación sobrestima la caída de presión en 80% o más [13].

También se emplea ampliamente un modelo para la caída de presión publicada por Hesketh [16]. El modelo está basado en la correlación de datos experimentales obtenidos de muchas diferentes torres de limpieza. La ecuación de Hesketh's para la caída de presión está dada por:

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0.133}}{507} \left( 0.56 + 0.125 \left( \frac{L}{G} \right) + 0.0023 \left( \frac{L}{G} \right)^2 \right) \quad (2.19)$$

donde  $\Delta P$  = caída de presión a través del venturi en pulgadas de agua (*in H<sub>2</sub>O*),  
 $v$  = velocidad de garganta en pies por segundo (ft/s),  
 $\rho_g$  = densidad de la corriente de gas saturada en pies por pie cúbico (lb/ft<sup>3</sup>),  
 $A$  = área de la sección transversal de la garganta en pies cuadrados (ft<sup>2</sup>), y  
 $L/G$  = relación líquido a gas en galones por 1000 pies cúbicos (gal/1000 ft<sup>3</sup>).

Esta ecuación se simplifica con frecuencia a:

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0.133} \left( \frac{L}{G} \right)^{0.78}}{1270} \quad (2.20)$$

Hesketh determinó experimentalmente una relación entre la caída de presión y la eficiencia de recolección [2]. Basado en los datos obtenidos, Hesketh concluyó que el venturi es esencialmente 100% eficiente para partículas mayores que 5  $\mu$ m. Desarrolló una correlación entre la caída de presión y la penetración para tamaños de partícula por debajo de éste valor, dada por:

$$P_t = \frac{C_i}{C_o} = 3.47 \Delta P^{-1.43} \quad (2.21)$$

donde  $C_i$  y  $C_o$  = concentración de partículas <5  $\mu\text{m}$  a la entrada y salida del venturi en base masa, y  
 $\Delta P$  = caída de presión, *in* H<sub>2</sub>O.

En la Figura 2.6 se presenta la caída de presión para una torre de limpieza por venturi rectangular.[2]

#### 2.5.4.1.2 Teoría de la potencia de contacto

La potencia de contacto se define como la energía disipada por unidad de volumen de gas tratado. La teoría de la potencia de contacto fue desarrollada por Lapple y Kamack [17] y extendida por Semrau [18,19]. Establece que todas las torres de limpieza dan el mismo grado de recolección de partículas al mismo nivel de consumo de potencia independientemente de como se obtenga la potencia, ya sea por la caída de presión de la fase gas, la atomización de la fase líquida o por medios mecánicos. Con frecuencia también se le conoce como la “Teoría de la energía equivalente”

La potencia de contacto total,  $P_T$ , dada por:

$$P_T = P_G + P_L + P_{mech} \quad (2.22)$$

donde  $P_T$  = potencia de contacto total,  
 $P_G$  = potencia dada a la caída de presión del gas que pasa a través de la torre de limpieza,  
 $P_L$  = potencia dada a la atomización del líquido limpiador, y  
 $P_{mech}$  = potencia dada por dispositivos mecánicos para incrementar el contacto, por ej., un rotor.

La potencia de contacto está determinada por la pérdida de fricción a través de la porción mojada de la torre de limpieza [5]. Se supone que la caída de presión debida a la cinética de la corriente de gas es despreciable.

$P_G$  es la potencia del contacto por la contribución de energía de la corriente de gas, generalmente expresada como caballos de fuerza por 1000 pies cúbicos por minuto por debajo de las condiciones reales, (*hp/1000 acfm*). Para la mayoría de las torres de limpieza,  $P_G$  domina la ecuación de potencia de contacto total. Se estima a partir de la caída de presión medida a través de la torre de limpieza:

$$P_G = 0.157\Delta P \quad (2.23)$$

donde  $\Delta P$  = caída de presión a través del venturi, *in* H<sub>2</sub>O.

**Tabla 2.2:** Parámetros de correlación de potencia de contacto de torres de limpieza [2, 14]

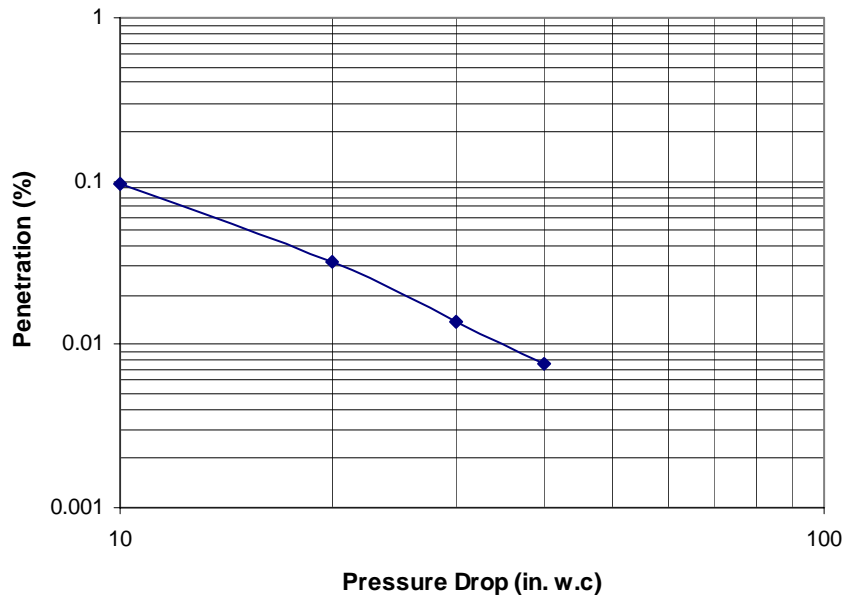
Aerosol	Torre de limpieza	$\alpha$	$\beta$
Polvo de horno de cal	Aspersión ciclónica y venturi	1.47	1.05
Polvo de horno de cal prelavado	Venturi, tubería y aspersión ciclónica	0.915	1.05
Polvo de talco	Venturi	2.97	0.362
Polvo de talco	Orificio y tubería	2.7	0.362
Rocío de ácido fosfórico	Venturi	1.33	0.647
Polvo de cúpula de fundidora	Venturi	1.35	0.621
Caldera de fogón abierto de acero	Venturi	1.26	0.569
Polvo de talco	Ciclón	1.16	0.655
Horno de ferrosilicón	Venturi y aspersión ciclónica	0.870	0.459
Rocío oloroso	Venturi	0.363	1.41

#### 2.5.4.1.3 *Curvas de funcionamiento*

Una curva de funcionamiento es la eficiencia de la recolección de la torre de limpieza como una función del diámetro de la partícula a una caída de presión especificada. Las curvas son específicas a cada diseño de venturi. En general, se presentan varias curvas para varias caídas de presión. Las curvas de funcionamiento deben de obtenerse del fabricante. La Figura 2.6 es un ejemplo de curva de funcionamiento para un venturi rectangular [2].

La eficiencia de recolección debe calcularse para obtener la penetración de toda la MP. La eficiencia de recolección total es la suma de las eficiencias de recolección fraccionales en cada rango de tamaño de partículas. Este cálculo se presenta en la Sección 2.5.2, Ecuación 2.4. La eficiencia de recolección para cada rango de tamaño se lee en una curva de funcionamiento. La eficiencia de recolección fraccional es la fracción masa del rango de tamaño multiplicado por la eficiencia de recolección para ese rango. Sumando estos valores se obtiene la eficiencia de recolección acumulativa,  $\eta_d$ , a una caída de presión específica. La penetración total,  $P_p$ , puede ser calculada de  $\eta_d$  usando la Ecuación 2.5.

Ya que cada presión tiene su propia curva, la penetración total a diferentes caídas de presión debe ser calculada usando el procedimiento descrito anteriormente. Entonces, la penetración total,  $P_{t_p}$ , se grafica para cada presión como se muestra en la Figura 2.11. La caída de presión de diseño a través de la torre de limpieza se lee en la gráfica basada en la penetración total requerida.



**Figura 2.11:** Penetración vs. caída de presión tal como se determina por las curvas de funcionamiento

#### 2.5.4.1.4 Método del diámetro de corte de Calvert

El método supone que el parámetro de diseño más significativo para una torre de limpieza húmeda es el diámetro de la partícula que es recolectada a 50% de eficiencia o el “diámetro de corte” [20]. Para utilizar este método se requiere una distribución log-normal de tamaño de partícula. Relaciona el diámetro de corte a la eficiencia de recolección y a los parámetros de la distribución del tamaño.

La penetración de la torre de limpieza es modelada como una función exponencial del diámetro aerodinámico dado por:

$$Pt_j = e^{\left(-A d_j^B\right)} \quad (2.27)$$

donde  $Pt_j$  = penetración de la partícula de diámetro  $j$ ,  
 $d_j$  = diámetro de la partícula de tamaño  $j$ , y  
 $A, B$  = constantes empíricas.

$B$  es una constante que es específica de la torre de limpieza.  $B$  es igual a 2.0 para torres de limpieza húmedas por venturi, de lecho empacado y de bandejas y  $B$  es igual a 0.67 para torres de limpieza húmedas ciclónicas.

La penetración total está dada por:

$$Pt_d = \int Pt_j m_j \quad (2.28)$$

donde  $Pt_d$  = penetración total,  
 $Pt_j$  = penetración de la partícula de diámetro de tamaño  $j$ , y  
 $m_j$  = fracción masa de la partícula de diámetro de tamaño  $j$ .

El método del diámetro de corte de Calverto utiliza la relación de corte definida como:

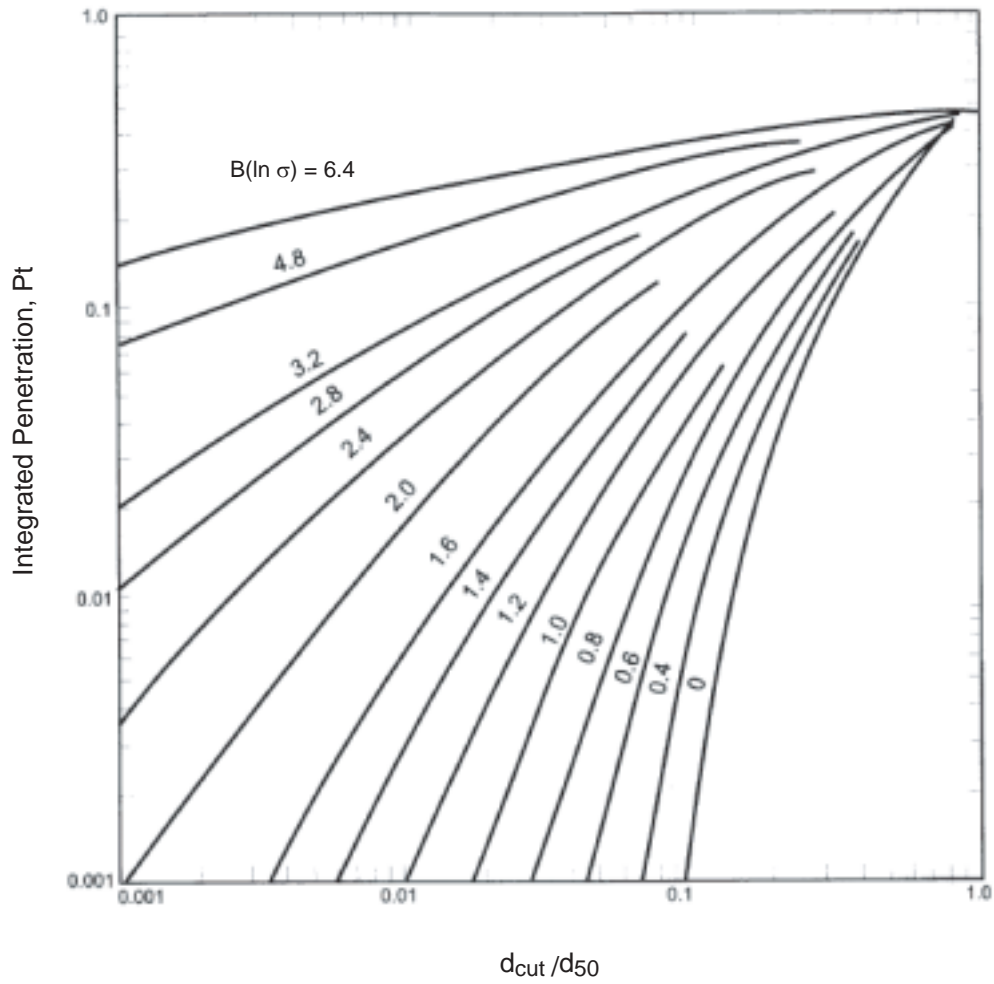
$$Cut\ Ratio = \frac{d_{cut}}{d_{50}} \quad (2.29)$$

donde  $d_{cut}$  = el diámetro de corte requerido, y  
 $d_{50}$  = el diámetro aerodinámico de la mediana de masa.

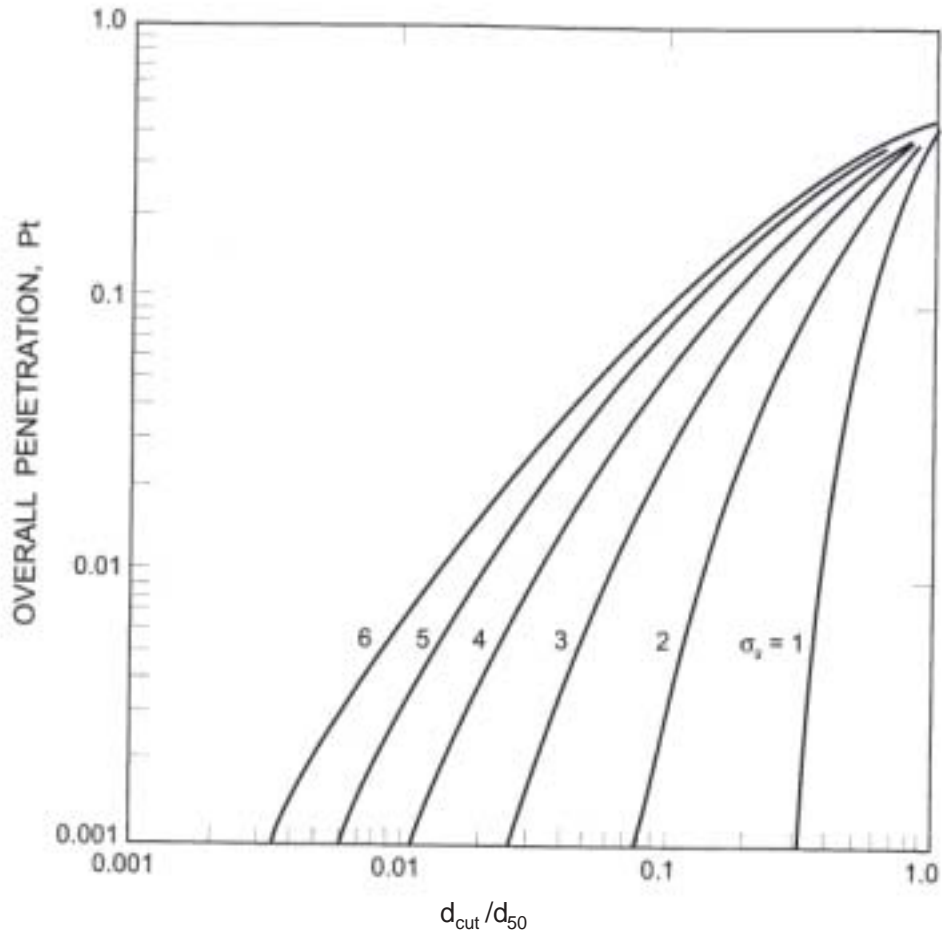
La sección 2.5.1, Distribución y carga de la MP, presenta los cálculos del diámetro de la mediana de masa y la desviación standard de una desviación log-normal.

El requisito de diseño para penetración total y la desviación estándar de la distribución definen el diámetro de corte. El diámetro de corte puede obtenerse gráficamente utilizando el diámetro de corte de curvas de funcionamiento específicas de cada fabricante. En la Figura 2.12 y la Figura 2.13 de la guía del equipo publicada por *Calvert Environmental Equipment, Inc.*, se presenta la penetración como una función de la desviación estándar de la distribución y la relación de corte. Nótese que la Figura 2.13 es la misma que la Figura 2.12 pero supone que  $B=2.0$ . La relación de corte requerida se lee en la curva y se utiliza para calcular el diámetro de corte.





**Figura 2.12:** Diámetros de corte como función de la relación de corte y la desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula [20]



**Figura 2.13:** Diámetro de corte como función de la relación de corte y la desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula para  $B = 2.0$ , [20]

Una vez que el diámetro de corte es conocido, la caída de presión y la potencia de la torre de limpieza, caballos de fuerza por 1,000 *acfm* de gas tratado, pueden leerse en otra curva de funcionamiento específica para cada proveedor. Un ejemplo de éste tipo de curva de funcionamiento está dado en la Figura 2.14. Presenta la caída de presión y la potencia de la torre de limpieza para varios tipos de torres. El requisito de potencia en ésta figura supone una eficiencia del ventilador de 50%. Para obtener los requisitos de potencia a otras eficiencias, utilice la siguiente relación:

$$Power_{\eta_2} = Power_{\eta_1} \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (2.30)$$

La potencia de contacto por la contribución de energía de la corriente de líquido,  $P_L$ , está también expresada en  $hp/1000 acfm$ . Está basada en la relación líquido a gas y dada por:

$$P_L = 0.583 p_L \left( \frac{L}{G} \right) \quad (2.24)$$

donde  $p_L$  = presión del líquido de entrada en libras por pulgada cuadrada (psi), y  
 $L/G$  = relación líquido a gas en galones por pies cúbicos (gal/ft<sup>3</sup>).

En la Tabla 2.1 se presentan los parámetros de operación para diferentes torres de limpieza.

**Tabla 2.1:** Parámetros de operación de torres de limpieza para materia particulada, [2, 12]

Tipo de torre	Caída de presión (in. H <sub>2</sub> O)	Relación L/G (gal/1000 acf)	Presión del Líquido (psig)	Velocidades de gas (ft/sec)	Diámetro de corte (μm)
Torre de Aspersión	0.5-3	0.5-20	10-400	10	2-8
Ciclónica	2-10	2-10	10-400	105-140b	2-3
Venturi	10-150	2-20	0.5-2	90-400c	0.2

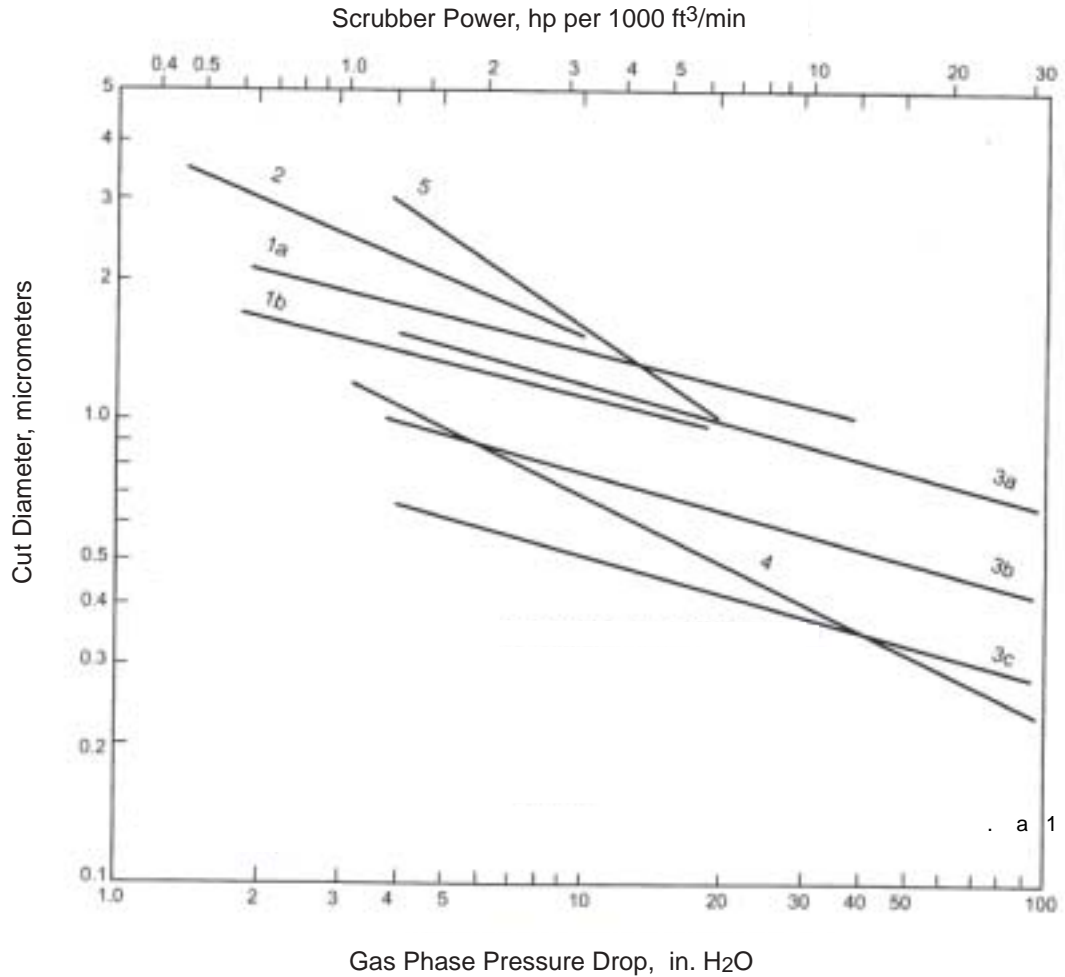
La potencia de contacto está correlacionada con la eficiencia de recolección de la torre de limpieza,  $\eta$ . Esta correlación se expresa frecuentemente como el número de “unidades de transferencia”, un número adimensional definido por la ecuación:

$$N_t = \ln \left( \frac{1}{1-\eta} \right) \quad (2.25)$$

El número de unidades de transferencia para una potencia de contacto dada depende del tipo de torre de limpieza y de las características de la materia particulada. Para una torre de limpieza y un tipo de materia particulada dados, la relación entre la unidad de transferencia y la potencia de contacto es:

$$N_t = \alpha P_T^\beta \quad (2.26)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes empíricos los cuales son característicos del tipo de torre de limpieza y de la materia particulada recolectada. En la Tabla 2.2 se presentan los coeficientes para varios tipos de torres de limpieza. [2, 14] La caída de presión asociada con esa eficiencia de recolección puede entonces calcularse.



- 1a. Columna de placa-tamiz con densidad de espuma de 0.4 g/cm<sup>3</sup> y 0.2-in de diámetro de orificio. El número de platos no afecta mucho la relación. (Datos experimentales y modelo matemático)
- 1b. Igual que 1a excepto 0.125-in de diámetro de orificio.
2. Columna empacada con anillos o sillas de montar de 1-in. La profundidad del empaque no afecta mucho la relación. (Datos experimentales y modelo matemático)
- 3a. Lecho empacado de fibras con fibras de 0.012-in de diámetro – cualquier profundidad. (Datos experimentales y modelo matemático)
- 3b. Igual que 3a excepto fibras de 0.004-in de diámetro
- 3c. Igual que 3a excepto fibras de 0.002-in de diámetro
4. Aerosol de gas atomizado.
5. Lecho móvil con 1-3 etapas de esferas huecas de plástico, fluidizadas. (Datos experimentales de planta piloto y de plantas a gran escala de torres de limpieza)

**Figura 2.14:** Potencia y caída de presión de la torre de limpieza como función del diámetro de corte, [23]

#### 2.5.4.2 Velocidad y área de sección transversal de la torre de limpieza

Cualquiera de los cuatro métodos discutidos previamente puede ser usado para estimar la caída de presión que se requiere para obtener una eficiencia de recolección dada. Esta caída de presión determina la velocidad del gas requerida en la garganta del venturi. La velocidad de garganta depende de:

- la mezcla del gas y del líquido de limpieza y de la relación L/G,
- la turbulencia,
- la distribución de la mezcla líquido- gas y de la MP a través de la garganta, y
- las pérdidas hidráulicas a través de la garganta.

La velocidad de garganta está limitada por las velocidades de gas aceptables en el equipo de la torre corriente abajo, tal como el eliminador de rocío.

Hay ecuaciones teóricas disponibles para calcular la velocidad de garganta, sin embargo, la mayoría de los fabricantes determinan la velocidad de garganta experimentalmente. La velocidad de garganta y el área de sección transversal pueden estimarse usando una ecuación de Bernoulli modificada: [12]

$$v_t = \frac{Q_m}{A_t} = C \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{sat}}} \quad (2.31)$$

donde

$v_t$	= velocidad en la garganta,
$A_t$	= área de sección transversal de la garganta,
$Q_m$	= razón de flujo volumétrico máximo real de aire,
$\rho_{sat}$	= densidad del gas al punto de saturación, y
$C$	= constante.

C es una función de la relación L/G. Para venturis con una sección convergente de 30°, una sección divergente de 10° a 12°, y una densidad de gas de 0.06 lb/ft<sup>3</sup>, se desarrolló una relación entre C y L/G [12]:

$$C = 1060 e^{(-0.279 L/G)} \quad (2.32)$$

El aumentar la densidad de gas por encima de 0.075 causa que el valor de C, y por ende el de  $v_t$ , aumenten rápidamente debido a la mayor resistencia del gas.

El área de sección transversal de la garganta se calcula a partir de las velocidades de entrada y de garganta de la torre de limpieza:

$$A_t = A_i \frac{v_t}{v_i} \quad (2.33)$$

donde  $A_t$  y  $A_1$  = área de garganta y de entrada, respectivamente.

Las dimensiones de la garganta pueden ser estimadas del área de la sección transversal de la garganta. El diámetro de una garganta circular y el ancho de una garganta rectangular pueden ser calculadas de:

$$\begin{aligned}d_t &= \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} \text{ for circular throat} \\d_t &= \sqrt{A_t} \text{ for rectangular throat}\end{aligned}\tag{2.34}$$

La longitud de la garganta y de la sección divergente del venturi se optimizan para la recuperación de presión. Para una recuperación de presión óptima, la longitud de la garganta es generalmente del orden de 3 veces el diámetro de la garganta (o el ancho) y la longitud de la sección divergente es generalmente 4 veces el diámetro de la garganta (o el ancho).

$$\begin{aligned}l_t &= 3 d_t \\l_{div} &= 3 d_t\end{aligned}\tag{2.35}$$

La dirección del flujo del gas que sale del venturi es frecuentemente desviado  $90^\circ$  antes de entrar al separador de partículas. Debido a la alta velocidad del gas, la caída de presión al cambiar la dirección del flujo puede ser alta. El radio de la sección del codo del conducto debe ser suficientemente grande para minimizar la caída de presión a través de la unión. Véase la Sección 2, Capítulo 1 Campanas, Conductos y Chimeneas para el costo y diseño de tamaño de secciones de conductos. El diseño de los ciclones y los eliminadores de rocío está más allá del alcance de éste documento. Varias de las referencias discuten el diseño de éstos componentes, incluyendo [2, 3, y 4].

## 2.5.5 Consumibles

### 2.5.5.1 Uso de Agua

La mayoría de los sistemas de torres de limpieza húmedas recirculan el líquido limpiador. A fin de disminuir el contenido de sólidos del líquido, se drena del sistema parte del líquido y se añade agua limpia. Las torres de limpieza por venturi tienen típicamente concentraciones pico de sólidos de 20 a 30% [1]. Una carga de MP más alta en la corriente del gas requiere una razón de drenado más alta, resultando en un volumen más grande de líquido residual y en costos de disposición más altos.

El flujo masa de la materia particulada hacia el líquido de limpieza es:

$$\dot{m}_{PM} = \eta L_{PM} Q_i \quad (2.36)$$

donde

$\dot{m}_{PM}$	= razón de flujo masa de la MP,
$\eta$	= eficiencia de recolección total de la torre de limpieza,
$L_{PM}$	= carga de MP a la entrada, y
$Q_i$	= razón de flujo de gas residual a la entrada.

Usando la densidad de agua, 1.0 kg/l (8.3 lb/gal) y la concentración de sólidos de diseño, puede calcularse una razón de drenado de líquido de limpieza como:

$$Q_{bleed} = \frac{\dot{m}_{PM}}{f_{solids} \rho_{H2O}} \quad (2.37)$$

donde

$Q_{bleed}$	= razón de drenado, y
$f_{solids}$	= fracción masa de los sólidos en el agua de recirculación.

La razón de flujo total de agua requerida por el sistema,  $Q_T$ , es la suma del agua evaporada y el agua drenada dada por:

$$Q_{T(H2O)} = Q_{wv(evap)} + Q_{bleed} \quad (2.38)$$

El agua total consumida está dada por:

$$V_{T(H2O)} = Q_{T(H2O)} t \quad (2.39)$$

donde

$V_{T(H2O)}$	= volumen anual de agua consumida, y
$t$	= tiempo de operación por año de la torre de limpieza.

Para un sistema de venturi de chorro que utiliza un sistema de aspersion neumática, el uso del aire también debe incluirse como un consumible.

#### 2.5.5.2 Uso de energía eléctrica

De la caída de presión a través del sistema, puede calcularse la potencia de arranque requerida por el ventilador usando la ecuación siguiente de la Sección 1:

$$HP_{fan} = \frac{\Delta P Q_i}{6356 \eta_{fan}} \quad (2.40)$$

donde  $HP_{fan}$  = caballos de fuerza de arranque del ventilador, *hp*,  
 $\eta$  = eficiencia del ventilador, y  
 $\Delta P$  = presión del ventilador, pulgadas de columna de agua

La potencia requerida por la bomba para recircular el líquido de limpieza a través del sistema se calcula similarmente como:

$$HP_{pump} = \frac{\Delta P_{pump} \text{ L/G} \frac{Q_i}{1,000} \gamma}{3952.6 \eta_{pump}} \quad (2.41)$$

donde  $HP_{pump}$  = caballos de fuerza de la bomba, *hp*,  
 $\eta_{pump}$  = eficiencia del ventilador,  
 $\Delta P_{pump}$  = caída de presión de la bomba, pies de columna de agua,  
 $L/G$  = relación líquido a gas, gal/1000 ft<sup>3</sup>,  
 $Q_i$  = razón de flujo de entrada, *acfm*, y  
 $\gamma$  = gravedad específica del líquido de limpieza.

Para un sistema de venturi de chorro, los requisitos de la bomba o del compresor para el sistema de boquillas hidráulicas o neumáticas, deben también incluirse en los cálculos del consumo de energía. En la Tabla 2.3 se presentan los requisitos típicos de bombas y ventiladores para varias torres de limpieza.

**Tabla 2.3:** Requisitos de energía de la bomba y del ventilador (1,000 cfm;  $\eta=90\%$  a  $\mu\text{m}$ ), [13]

Tipo de unidad	Flujo del líquido (gpm)	Presión (psig)	Bomba <i>hp</i>	$\Delta P$ del gas ( <i>in.wg</i> )	Ventilador <i>hp</i>	<i>hp</i> /1,000 <i>cfm</i> relativos
Ciclón húmedo	10	60	0.91	8	2.5	3.41
Venturi	10	20	0.233	15	3.94	4.27
Venturi de chorro	40	70	3.28	0	0	3.28



## 2.6 Análisis de costos

La metodología de estimación de costos presentada aquí, proporciona una herramienta para estimar costos de capital y anuales a nivel de estudio de torres de limpieza por venturi. Las ecuaciones y los factores de costo para las torres de limpieza por venturi se basan en el método dado en Estimación de Costos de Equipo de Control de la Contaminación. [12] El lector no deberá sorprenderse si se obtienen cotizaciones del proveedor que difieren de estas estimaciones hasta en un  $\pm 25$  por ciento, ya que ellas representan costos a nivel de estudio. La selección real de la opción más efectiva en costo debe estar basada en un estudio detallado de ingeniería y en cotizaciones de costo de los proveedores de sistemas. Los costos están dados en dólares del 2002. Los costos pueden ser ajustados a otros años utilizando el Índice de Costos de Ingeniería Química o el Índice *VAPCCI* para torres de limpieza por venturi.

Las ecuaciones de costo se aplican a fuentes industriales de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  con razones de flujo de aire entre 100 *acfm* y 200,000 *acfm*. No es apropiado extrapolar las razones de flujo mas allá de aquellas presentadas. La eficiencia de recolección total varía entre 97% a 99.9%. Se supone que el gas residual tiene valores nominales de distribución de MP, razones de carga de MP, temperaturas y contenido de humedad.

### 2.6.1 Inversión de capital total

La inversión de capital total (*Total Capital Investment (TCI)*), incluye los costos asociados con la compra de la unidad del venturi y los costos directos e indirectos asociados con la instalación de la unidad. La ecuación de la *TCI* está dada por:

$$TCI = PEC + DC + IC \quad (2.42)$$

donde

PEC	=	costos de equipo comprado
DC	=	costos directos de instalación
IC	=	costos indirectos de instalación

En general, la instalación de una torre de limpieza húmeda por venturi no requiere la construcción de edificios, preparación del sitio, instalaciones fuera del sitio, terreno y capital de trabajo. En la Sección 1, Capítulo 2 de este Manual puede encontrarse una discusión más detallada del *TCI*.

#### 2.6.1.1 Costo de equipo comprado

El costo de equipo comprado (*Purchased Equipment Cost (PEC)*), de un sistema de torre de limpieza húmeda por venturi es la suma de los costos del equipo del venturi, instrumentos y controles, impuestos y fletes. Los últimos tres conceptos generalmente se calculan como

porcentajes del costo del equipo. En la Tabla 2.4 se muestran valores típicos para instrumentos y controles, impuestos y fletes.

**Tabla 2.4:** Estimación de costos de instrumentación, impuestos y fletes

Concepto	Porcentaje del costo del equipo
Instrumentos y controles	10%
Impuestos	3%
Fletes	5%

Las ecuaciones de costo del equipo del venturi se desarrollaron realizando una regresión de mínimos cuadrados de datos de costos proporcionados por tres proveedores. Los costos fueron dados para tres tipos de sistemas de venturi en paquete; venturi de garganta fija, venturi de chorro y venturi de garganta variable. Los sistemas en paquete incluyeron el siguiente equipo básico:

- venturi,
- sistema de inyección de líquido,
- ciclón, y
- eliminador de rocío.

El equipo adicional requerido para el venturi pero no incluido en la estimación del costo incluye lo siguiente:

- bomba de reciclaje,
- ventilador de tiro inducido,
- válvulas y tuberías, o
- instrumentación básica y controles

El costo del equipo del sistema de venturi en paquete varía en directa proporción a la razón del flujo del gas residual. Nótese que ésta razón de flujo corresponde al gas residual saturado,  $Q_{sat}$ , no a la razón del flujo de gas residual de entrada [24]. Las ecuaciones de costo usan el volumen del gas residual saturado ya que el flujo real puede variar ampliamente en base a la temperatura, humedad y presión.

El costo de un venturi por pie cúbico de gas tratado disminuye a medida que el volumen del gas aumenta debido a la economía de la escala. Sin embargo, si la torre de limpieza se hace muy grande para ser enviada como una unidad en paquete y debe ser erguida en el sitio, el costo por pie cúbico de gas tratado aumenta. Una unidad de venturi requiere ser erguida en el sitio cuando el diámetro del ciclón separador excede el diámetro transportable, generalmente 12.5 pies de diámetro interno. Esto es equivalente a aproximadamente 90,000 a 100,000 *acfm* de gas saturado[24].

En la Tabla 2.5 se presenta las ecuaciones para el costo de equipo para cada uno de los tipos de sistema de venturi en paquete. Las ecuaciones son para sistemas de venturi construidos de acero al carbón y de Aleación C-276. En la Tabla 2.6 se proporcionan multiplicadores para otros materiales incluyendo acero inoxidable 304 y 316, plástico reforzado con fibra de vidrio (*fiberglass reinforced plastic (FRP)*), acero recubierto de caucho y acero revestido con resina epóxica. Los costos del equipo son “libre a bordo” (*free on board (FOB)*), lo cual significa que ni los impuestos ni el flete están incluidos. El costo de equipo adicional (bomba, ventilador, etc.,) es generalmente de 80% a 100% del costo del sistema de venturi en paquete. De la Figura 15 a la 17 se presentan las ecuaciones de costos como una función de la razón de flujo.

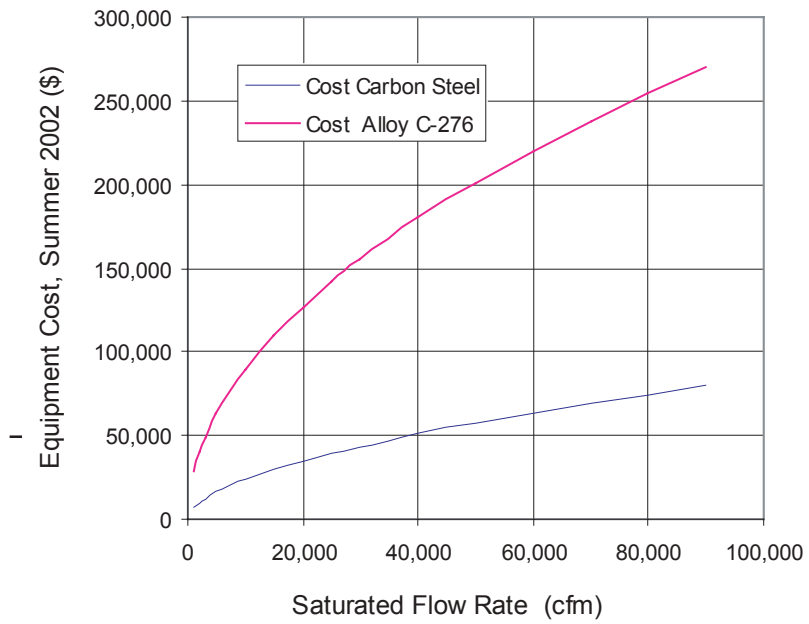
**Tabla 2.5:** Costos del equipo de venturi, Dólares del 2002

Tipo de unidad de venturi	Rango de razón de flujo de aire saturado ( <i>cfm</i> )	Ecuación de costo de equipo, \$	
		Acero al carbón	Aleación C-276
baja energía	1,000 a 90,000	$= 150 Q_{sat}^{0.56}$	$= 900 Q_{sat}^{0.5}$
alta energía	1,000 a 90,000	$= 170 Q_{sat}^{0.56}$	$= 1,300 Q_{sat}^{0.5}$
venturi de chorro en paquete <sup>1</sup>	100 a 10,000	$= 4.5 Q_{sat} + 19,000$	N/A
garganta variable	1,000 a 90,000	$= 1.1$ a $1.15$ del costo de la garganta fija	

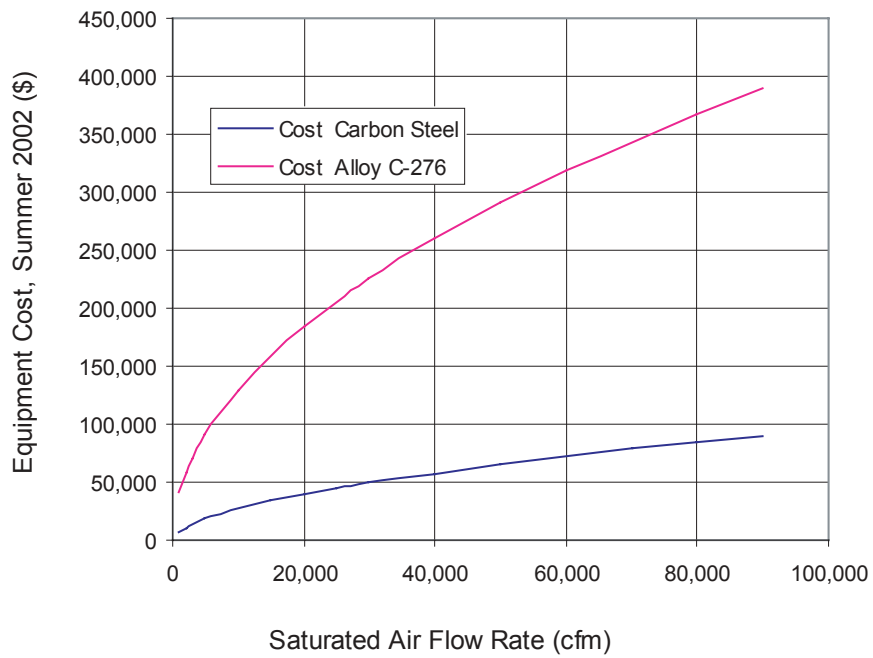
<sup>1</sup> El costo del venturi de chorro incluye bomba de reciclaje, ventilador de tiro inducido, válvulas y tuberías, instrumentación básica y la plataforma de montaje.

**Tabla 2.6:** Factores de costo de equipo de unidades de venturi construidas de otros materiales

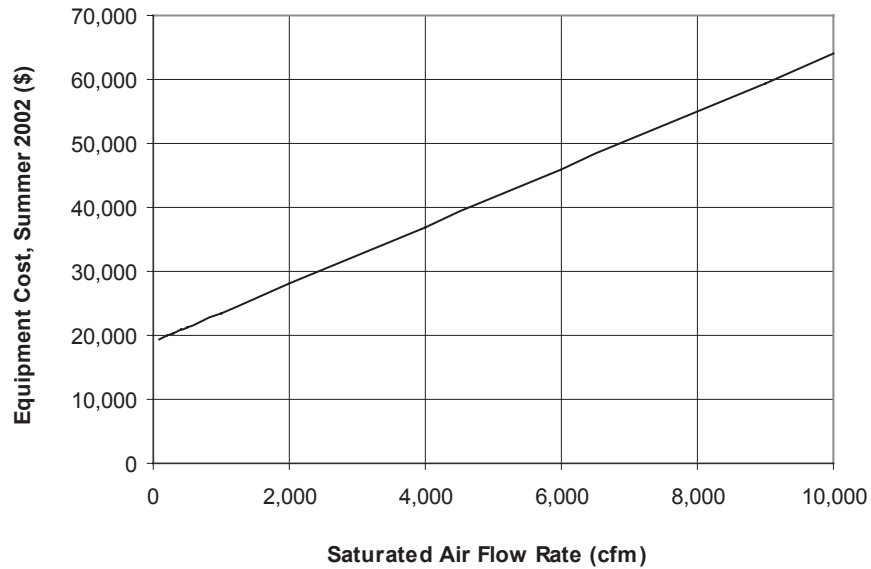
Material	Factor de costo de equipo
Acero inoxidable, 304L	1.08 - 1.16
Acero inoxidable, 316L	1.25 - 1.40
Plástico reforzado con fibra de vidrio ( <i>FRP</i> )	1.6 <sup>1</sup>
Recubierto de caucho	1.6 <sup>1</sup>
Recubrimiento de epoxi	1.1 <sup>1</sup>



**Figura 2.15:** Costos del equipo del venturi de baja energía



**Figura 2.16:** Costos del equipo del venturi de alta energía



**Figura 2.17:** Costos del equipo del venturi de chorros

Las caídas de presión más altas requieren un mayor espesor del material de construcción o de endurecimiento del material. El costo de la torre de limpieza aumenta con el espesor del material utilizado. Los sistemas de venturi con caídas de presión por encima de 15 *in w.c.* generalmente requieren de endurecimiento o de espesor mayor. Para el control de  $MP_{10}$ , la caída de presión está generalmente por debajo de 20 *in w.c.*, mientras que el control de  $MP_{2.5}$  generalmente requiere una caída de presión de 25 *in w.c.* o mayor [24]. En la Tabla 2.7 se presentan caídas de presión y materiales de construcción típicos para varias aplicaciones.

**Tabla 2.7:** Aplicaciones típicas de torres de limpieza por venturi y materiales of construcción, [5, 24]

<b>Aplicación</b>	<b>Caída de presión (in.wg)</b>	<b>Material de construcción</b>
Calderas		
Carbón pulverizado	15 - 40	Acero inoxidable 316L
Carbón de fogoneo	10 - 12	Acero inoxidable 316L
Corteza	6 - 12	Acero inoxidable o acero al carbón
Combinación	10 - 15	Acero inoxidable 316L
Recuperación acero	30 - 40	Carbón, 316L inoxidable, o aleación de
Incineradores		
Lodo de aguas residuales	18 - 20	Acero inoxidable 316L
Residuo Líquido	50 - 55	Aleación con alto níquel
Desechos Sólidos		
Municipales acero	20 - 35	Acero inoxidable 316L o aleación de
Patológicos acero	20 - 35	Acero inoxidable 316L o aleación de
Hospitalarios	20 - 45	on alto níquel
Hornos y calcinadores		
Cal	15 - 25	Acero inoxidable o acero al carbón
Carbonato de sodio	20 - 40	Acero inoxidable o acero al carbón
Cloruro de potasio	30	Acero inoxidable o acero al carbón
Otros		
Secadores	10 - 25	304 o 316L acero inoxidable
Quebradoras	6 - 20	Acero inoxidable
Secador de aspersion general	15 - 30	Acero inoxidable o acero al carbón

Nota: Las aleaciones de acero pueden requerirse si están presentes haluros corrosivos.

### 2.6.1.2 Costos directos e indirectos de instalación

Los costos directos de instalación incluyen los costos de mano de obra y materiales asociados con la instalación de la unidad de venturi. Estos costos incluyen equipo auxiliar (por ej., conductos, compresores), cimientos y soportes, manejo y construcción, instalación eléctrica, tuberías, aislantes y pintura. Los costos indirectos de instalación incluyen los costos de ingeniería y supervisión, construcción y los honorarios de contratistas, arranque y pruebas, capital de inventario y cualquier otro costo de contingencia del proceso y del proyecto. Utilizando la metodología presentada en la Sección 1 del *Manual*, Introducción y Metodología de Costos, los costos directos e indirectos de instalación son estimados de una serie de factores aplicados al costo de equipo comprado. Los factores requeridos están dados en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8:** Costos directos e indirectos de instalación de torres de limpieza por venturi , [12]

Concepto	Factor
<b>Costos Directos</b>	
Costos de equipo comprado	
Unidad de venturi en paquete	Según se estimó, A1
Costos auxiliares	Según se estimó, A2
Costos de equipo	$A = A1 + A2$
Instrumentación	$0.10 \times A$
Impuestos sobre venta	$0.03 \times A$
Flete	$0.05 \times A$
<b>Costo de equipo comprado, PEC</b>	<b><math>B = 1.18 \times A</math></b>
<b>Costos directos de instalación</b>	
Cimientos y soportes	$0.06 \times B$
Manejo y construcción	$0.40 \times B$
Eléctricos	$0.01 \times B$
Tubería	$0.05 \times B$
Aislante para conductos	$0.03 \times B$
Pintura	$0.01 \times B$
<b>Costos directos de instalación, DC</b>	<b><math>0.56 \times B</math></b>
Preparación del sitio	Según se requiera, SP
Edificios	Según se requiera, Bldg.
<b>Costos indirectos (instalación)</b>	
Ingeniería	$0.10 \times B$
Construcción y gastos en el sitio	$0.10 \times B$
Honorarios del contratista	$0.10 \times B$
Arranque	$0.01 \times B$
Pruebas de funcionamiento	$0.01 \times B$
Estudio de modelo	-
Contingencias	$0.03 \times B$
<b>Costos indirectos totales, IC</b>	<b><math>0.35 \times B</math></b>

Tal como se discute en la Sección 2.3.7, el equipo auxiliar requerido para la operación del venturi, puede incluir preenfriador, ciclón, campanas, chimenea y recalentador de gas. Los costos de las campanas, conductos y chimeneas se presentan en la Sección 2 de éste Manual. Los costos de capital y los de OyM de los ciclones son mínimos y se obtienen fácilmente de los proveedores. Los costos para el recalentamiento dependen del aumento de temperatura requerido por el gas residual.

Las instalaciones reconvertidas aumentan los costos de una torre de limpieza húmeda por venturi por la necesidad común de remover el equipo existente para crear nuevo espacio para la nueva torre de limpieza. También pueden requerirse conductos adicionales para redirigir el gas residual a la torre. La trayectoria del conducto está usualmente limitada por las estructuras existentes; pueden requerirse soportes adicionales y las áreas confinadas hacen que la construcción sea más larga y requiera más mano de obra. Las torres de venturi ocupan poco espacio, por lo que los costos de reconversión son generalmente mínimos. Aunque los costos de reconversión son específicos del sitio, puede aplicarse un multiplicador de 1.3 a 1.5 a la inversión de capital total para estimar estos costos a un nivel de estudio.

## 2.6.2 Costos anuales

El costo total anual (*Total annual cost (TAC)*), consiste de los costos directos e indirectos y los créditos por recuperaciones. No se incluyen los créditos por la recuperación de productos secundarios porque no hay productos reutilizables generados por las torres de limpieza húmedas. Por lo tanto, el *TAC* para los sistemas de venturi está dado por:

$$TAC = DAC + IAC \quad (2.43)$$

donde  $DAC$  = Costos directos anuales, y  
 $IAC$  = Costos indirectos anuales.

Cada uno de estos costos se discuten en las siguientes secciones. Puede encontrarse una discusión más detallada de los costos anuales en la Sección 1, Capítulo 2 de este *Manual*.

### 2.6.2.1 Costos directos anuales

Los costos directos anuales (*Direct annual costs (DAC)*), incluyen los costos variables y semivariables. Los costos directos anuales variables son las compras de servicios de electricidad y agua. Los costos directos anuales semivariables incluyen la mano de obra de operación y supervisión y los costos de mantenimiento (mano de obra y materiales).

$$DAC = AC_{labor} + AC_{maint} + AC_{elect} + AC_{water} \quad (2.44)$$



donde  $AC_{labor}$  = costo anual de mano de obra,  
 $AC_{maint}$  = costo anual de mantenimiento,  
 $AC_{elect}$  = costo anual de electricidad, y  
 $AC_{water}$  = costo anual de agua.

La cantidad y el costo de los aditivos patentados y de la disposición de residuos son específicos de la aplicación, por lo que no se estiman estos costos. Los costos de disposición de residuos dependen de si los residuos líquidos son deshidratados y dispuestos como lodos ó si son dispuestos en el sistema municipal de aguas residuales. Los costos de disposición de residuos aumentan considerablemente si los residuos clasifican como residuos especiales o peligrosos.

El costo de la mano de obra es una función del nivel de automatización. Se requiere menos mano de obra con controles automáticos pero los costos de capital son significativamente más altos para sistemas de torres de limpieza totalmente automatizados. Se supone que las torres de limpieza por venturi requieren de 2 a 8 horas de mano de obra operativa por jornada de trabajo [12]. Puede requerirse más horas de mano de obra para sistemas con razones de flujo altamente variables. Se supone que la mano de obra de supervisión es 15% de la mano de obra operativa y que la mano de obra de mantenimiento es de 1 a 2 horas por jornada. Se supone que el costo de los materiales requeridos para mantenimiento es de 100% del costo de la mano de obra de mantenimiento. [12]

En la Sección 2.5.5. se estimaron las cantidades de electricidad y de agua usadas por la torre de limpieza. Usando el consumo de electricidad estimado para la bomba y el ventilador,  $HP_{fan}$  y  $HP_{pump}$ , el costo anual de la electricidad se estima por la siguiente ecuación:

$$AC_{elect} = 0.7457 \left( \frac{kW}{hp} \right) (HP_{fan} + HP_{pump}) t Cost_E \quad (2.45)$$

donde  $t$  = tiempo de operación de la torre de limpieza en años, horas, y  
 $Cost_E$  = costo de la electricidad en dólares por kW (\$/kW).

El costo del agua se estima del volumen total del agua,  $V_{T(H2O)}$  calculado en la ecuación 2.39:

$$AC_{H2O} = V_{T(H2O)} Cost_{H2O} \quad (2.46)$$

donde  $Cost_{H2O}$  = costo del agua en dólares por galón (\$/gal).

### 2.6.2.2 Costo indirecto anual

En general, el costo indirecto anual (*Indirect Annual Cost, IAC*), (costos fijos), incluye impuestos prediales, seguro, cargos administrativos, gastos generales y el costo de recuperación de capital. En la Sección 1 del *Manual* se discuten éstos costos en detalle. Se supone que los costos administrativos, los prediales y el seguro son porcentajes del *TCI* [12]. Se supone que los gastos generales son iguales al 60% de la suma de mano de obra de operación, de supervisión y de mantenimiento y de los materiales de mantenimiento [12]. El costo de recuperación de capital está basado en la vida útil anticipada del equipo y en la tasa de interés anual empleada. En la Tabla 2.9 se sugieren factores f sugeridos para estos conceptos.

Para la torre de limpieza húmeda se supone una vida económica útil de 15 años. Para una vida de 15 años y una tasa de interés de 7 por ciento, el factor de recuperación de capital (*Capital Recovery Factor, CRF*), es igual a 0.1098. El costo de recuperación de capital del sistema, se estima entonces por:

$$CRF = 0.1098 TCI \quad (2.47)$$

**Tabla 2.9:** Factores de costo anual para torres de limpieza [12]

Concepto	Factor
<b>Costo directo anual, DC</b>	
Mano de obra de operación	
Operador	2 a 8 horas por jornada
Supervisor	15% del operador
Mantenimiento	
Mano de obra	1 a 2 horas por jornada
Material	100% de la mano de obra de mantenimiento
Servicios,	(razón de consumo) x (horas/año) x (costo de la unidad)
Ventilador	
Bomba	
Agua	
Materiales de operación	Específicos de la aplicación
Disposición de aguas residuales	Específicos de la aplicación
<b>Costos indirectos anuales, IC</b>	
Cargos administrativos	2% of de la inversión de capital total
Impuesto predial	1% de la inversión de capital total
Seguro	1% de la inversión de capital total
Gastos generales	60% del costo total de mano de obra y materiales
Recuperación de capital	0.1098 x inversión de capital total
<b>Costo total anual</b>	<b>DC + IC</b>

## 2.7 Problema de ejemplo

Los incineradores de lodos con frecuencia emplean torres de limpieza humedad para el control de las emisiones de materia particulada. El horno es generalmente del tipo de múltiples fogones o del tipo de lecho fluidizado. Las emisiones de gases del incinerador incluyen monóxido de carbón (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV) y ácido clorhídrico (HCl). Las emisiones de materia particulada incluyen ceniza y metales pesados. Los óxidos de metal serán adsorbidos en la materia particulada o estarán libres dentro de la corriente de gas. Los óxidos libres son generalmente de tamaño medio de partícula menor de 0.5 micras y no pueden ser removidos utilizando torres de limpieza convencionales. El contenido de humedad de un incinerador de lodo es muy alto, por lo que generalmente se emplea una torre de limpieza húmeda.

Este ejemplo es para un incinerador de lodos de múltiples fogones. Las condiciones de entrada al venturi son:

razón de flujo volumétrico	75,000 <i>acfm</i>
temperatura de entrada	450 °F
contenido de humedad	20%
carga de materia particulada	3 granos/ <i>scf</i>
densidad específica de la materia particulada	1.8

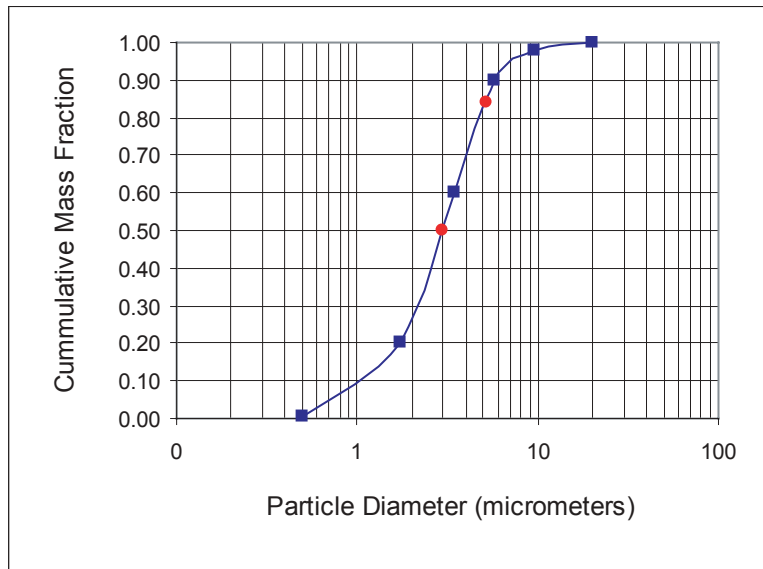
Los parámetros de diseño para la torre de limpieza son:

eficiencia de recolección requerida	90% para MP < 1.0 micra
-------------------------------------	-------------------------

La distribución del tamaño de partícula para un incinerador con distribución log-normal está dada en la Tabla 2.10 y en la Figura 2.18 se presenta la gráfica de la distribución.

**Tabla 2.10:** Distribución del tamaño de partícula para una fuente incinerador de lodos

Particle Size Range (microns)	Median Particle		Cummulative Mass Fraction
	Diameter (microns)	Mass Fraction	
0 - 1	0.50	0.005	0.005
1 - 2.5	1.75	0.195	0.200
2.5 - 4.5	3.50	0.400	0.600
4.5 - 7	5.75	0.300	0.900
7 - 12	9.50	0.080	0.980
> 12	20.00	0.020	1.000



**Figura 2.18:** Distribución del tamaño de partícula para el incinerador de lodos

De la Figura 2.18 la mediana del diámetro de la partícula,  $d_{50}$ , y el 84 por ciento del diámetro de la partícula,  $d_{84}$ , pueden leerse como:

$$d_{50} = 3$$

$$d_{84} = 5.1$$

Por lo tanto, la desviación estándar de la distribución según la Ecuación 2.1 es:

$$\sigma = \frac{5.1}{3} = 1.7$$

Ahora calcularemos las propiedades del gas residual a la salida de la torre de limpieza por venturi suponiendo saturación adiabática del gas residual. Usando la relación de gas ideal, calculamos la razón de flujo volumétrico del gas a condiciones estándar. Usaremos la siguiente información:

peso molecular del vapor de agua = 18  
 peso molecular del aire = 29  
 Volumen de una *lb-mole* de aire = 385 ft<sup>3</sup>

La razón de flujo del gas residual a temperatura estándar es:

$$75,000 \text{ acfm} \frac{(70^\circ\text{F} + 460)}{(350^\circ\text{F} + 460)} = 49,074 \text{ scfm}$$

La razón de flujo del aire seco y la masa del vapor de agua pueden ser calculadas de la Ecuación 2.12 y de los pesos moleculares.

La relación de humedad a temperatura estándar puede ser calculada:

$$\omega = \frac{574 \text{ lb/min of dry air}}{2,772 \text{ lb/min of water vapor}} = 0.21$$

De la tabla psicrométrica dada en la Figura 2.9, encontramos el punto en la tabla para la temperatura de bulbo seco de 350°F y relación de humedad de 0.21. Se sigue la línea de entalpía constante (púrpura) hacia la izquierda hasta la línea de saturación de 100% (línea roja). Este punto es a una temperatura de bulbo seco de 160°F, una relación de humedad de 0.26 y un volumen húmedo de  $22 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}} = 49,074 \text{ scfm} \times 75\% \times \frac{385}{29} = 2,772 \text{ lb/min of dry air}$

Las propiedades del gas residual a la salida de la torre de limpieza por venturi, pueden ahora calcularse. La razón del flujo de gas residual de salida está dada por la ecuación 2.13:

$$Q_{m(out)} = 22 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}} \times 2,772 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 60,984 \text{ scfm}$$

La relación de humedad de salida nos da la razón de flujo masa de salida del vapor de agua, tal como está dado en la Ecuación 2.14.

$$\dot{m}_{wv(out)} = 2,772 \frac{\text{lb}}{\text{min}} \times .26 = 721 \frac{\text{lb}}{\text{min}}$$

El agua evaporada del líquido de limpieza debido a la saturación adiabática de la corriente del gas de salida, se calcula de la Ecuación 2.15 como:

$$\dot{m}_{wv(evap)} = 721 \frac{\text{lb}}{\text{min}} - 574 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 147 \frac{\text{lb}}{\text{min}}$$

El volumen del vapor de agua de repuesto para la recirculación del sistema está dada entonces por la ecuación 2.16 como:

$$Q_{wv(evap)} = \frac{147 \text{ lb/min}}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 2.4 \text{ cfm} = 18 \text{ gpm}$$

El siguiente paso es calcular el tamaño de la torre de limpieza. El primer parámetro a estimar es la caída de presión a través del venturi. Emplearemos el método de Calver del diámetro de corte. Utilizamos la Figura 2.13 ya que es una torre de limpieza por venturi y B = 2.0.

Primero debemos determinar la eficiencia de recolección total. Suponiendo los siguientes requisitos de eficiencia de recolección para cada rango de tamaño, se calcula la fracción de la eficiencia de recolección de la fracción masa multiplicada por la eficiencia de recolección requerida (Ecuación 2.4):

Particle Size Range (microns)	Mass Fraction	Required Collection Efficiency	Fractional Collection Efficiency
0 - 1	0.005	0.900	0.0045
1 - 2.5	0.195	0.950	0.185
2.5 - 4.5	0.400	$d_{cut} = 0.2$ 0.980	0.392
4.5 - 7	0.300	$d_5$ 0.990	0.297
7 - 12	0.080	1.000	0.080
> 12	0.020	1.000	0.020
Overall Collection Efficiency		$d_{cut} = 0.2 \times 3 = 0.6$	<b>0.979</b>

Nótese que se supone que las partículas mayores de 5 micras son capturadas con una eficiencia de 100% para una torre de limpieza por venturi.

Leyendo la gráfica de la Figura 2.13 para el siguiente punto:

$$\sigma = 1.7$$

$$Pt = 1 - \eta_d = 0.02$$

Obtenemos un valor para la razón de corte y luego calculamos el diámetro de corte:

De la figura 2.14, una torre de limpieza por venturi con una caída de presión de aproximadamente 15 pulgadas de columna de agua con una potencia de 4.5 hp por 1,000 ft<sup>3</sup>/min es suficiente. Utilizando la figura 2.6, se estima la caída de presión aproximada de la torre de limpieza por venturi de 12 pulgadas de columna de agua.

Ahora podemos usar esta caída de presión estimada para determinar el tamaño del resto de la torre por venturi. Utilizando la Figura 3.10 y suponiendo una L/G de 10 galones por 1,000 acfm obtenemos una velocidad de garganta aproximada de 320 ft/s. Utilizando la ecuación 2.17, podemos estimar la velocidad en la garganta. Necesitamos la densidad del aire a condiciones de saturación, la cual es el inverso del volumen húmedo.

$$HP_{fan} = \frac{15 \text{ in water} \times 75,000 \text{ acfm}}{6356 \times 0.6} = 294 \text{ hp}$$

La potencia de arranque de la bomba es calculada de la Ecuación 2.36. Primero, debemos calcular la gravedad específica del líquido de limpieza. Suponiendo que el líquido de limpieza es agua y que la gravedad específica de la MP es de 1.8, podemos estimar la gravedad específica del lodo como:

$$\gamma_{slurry} = \frac{\% \text{ solids} + \% \text{ water}}{\frac{\% \text{ solids}}{\gamma_{PM}} + \frac{\% \text{ water}}{\gamma_{water}}} = \frac{25 + 75}{\frac{25}{1.8} + \frac{75}{1.0}} = 1.125$$

Tenemos una longitud de garganta de 13.5 ft y una sección divergente de 18 ft, resulta en una longitud total de 31.5 ft. Por lo tanto, podemos suponer que la bomba debe ser diseñada para 40 pies de columna de agua. Esto nos da la potencia de la bomba como:

$$HP_{pump} = \frac{40 \text{ ft} \times 10 \frac{\text{gal}}{1000 \text{ acfm}} \times \frac{75,000 \text{ acfm}}{1000} \times 1.125}{3952.6 \times 0.5} = 17 \text{ hp}$$

Ahora pasamos a estimar los costos de capital de la torre de limpieza. El venturi debe ser diseñado para una razón de flujo saturado de 60,984 acfm. La caída de presión requerida es de 15 pulgadas de agua, por lo tanto, es suficiente un venturi de baja energía. El material de construcción debe ser Acero Inoxidable 304 L ya que la corriente de gas residual contiene corrosivos. Aplicando el multiplicador para materiales a la ecuación de costos del equipo nos da:

$$Venturi EC = 1.10 \left[ 150 \times 61,000^{0.56} \right] = \$78,950$$

Este valor debe ser aumentado de 80% a 100% para tomar en cuenta el costo de las bombas, un ventilador de tiro inducido, tuberías, válvulas, instrumentación y control. Se supone que se requiere un nivel moderado de automatización y por lo tanto el costo del equipo básico se aumenta 90% para tomar en cuenta el equipo adicional.

$$Total EC = \$78,950 (1.0 + 0.9) = 150,000$$

Al agregar equipo adicional, impuestos y fletes a los costos del equipo básico resulta en el *PEC* dado por:

$$PEC = \$150,000 (1.0 + 0.03 + 0.05) = \$162,000$$

Los costos directos e indirectos de instalación están dados en la Tabla 2.8. Usando estos factores podemos calcular la *TCI* como:

$$TCI = \$162,000 (1.0 + 0.56 + 0.35) = \$309,420$$

Suponiendo que el sistema es una reconversión de baja dificultad, debemos aumentar la *TCI* por un factor de 1.3

$$TCI \text{ con reconversión} = 1.3 (\$309,420) = \$402,250$$

Los costos totales anuales incluyen los costos directos anuales y los costos indirectos anuales. Primero calculamos el costo de la mano de obra y de los materiales:

$$Operating Labor = \frac{3hr}{shift} \times \frac{2shifts}{day} \times \frac{300days}{yr} \times \frac{\$20.00}{hr} = \$39,600 \text{ per year}$$

$$Supervisory Labor = 0.15 \times 39,600 = \$5,940 \text{ per year}$$

$$Maintenance Labor = \frac{1hr}{shift} \times \frac{2shifts}{day} \times \frac{300days}{year} \times \frac{\$20.00}{hr} = \$13,200 \text{ per year}$$



$$AC_{labor} = \$39,000 + \$5,940 + \$13,200 = \$58,740 \text{ per year}$$

$$AC_{materials} = 100\% (\$132,000) = \$13,200 \text{ per year}$$

Luego, calculamos el costo de los servicios.

$$AC_{elect} = 0.7457 \frac{kW}{hp} \times (294hp + 17hp) \times \frac{330days}{yr} \times \frac{16hr}{day} \times \frac{\$0.07}{kWh} = \$85,720 \text{ per year}$$

$$AC_{H_2O} = 28gpm \times \frac{330days}{yr} \times \frac{16hr}{day} \times \frac{60min}{hr} \times \frac{\$0.2}{1,000gal} = \$1,770 \text{ per year}$$

Así que la suma de costos directos anuales es la suma de estos costos:

$$DAC = \$58,740 + \$13,200 + \$85,720 + 1,770 = \$159,430 \text{ per year}$$

Los costos indirectos anuales incluyen gastos generales, cargos administrativos, impuestos prediales y el factor de recuperación de capital. En la siguiente tabla se detallan estos costos.

<b>Costo indirecto anual</b>	<b>Factor</b>	<b>Costo por año</b>	
Gastos generales 60%	$(AC_{labor} + AC_{materials})$	0.60 (\$58,740+\$13,200) =	\$43,160
Costos administrativos	2% TCI	0.02 (\$402,250) =	\$8,050
Impuestos prediales	1% TCI	0.01 (\$402,250) =	\$4,020
Seguro	1% TCI	0.01 (\$402,250) =	\$4,020
Recuperación de capital	0.1098 TCI	0.1098 (\$402,250) =	\$44,170
<b>IAC Total</b>			<b>\$103,420</b>

El costo total anual es la suma de los costos directos e indirectos anuales dado por:

$$TAC = \$159,430 + \$103,420 = \$262,850 \text{ per year}$$

## 2.8 Reconocimientos

Agradecidamente reconocemos a las siguientes compañías por contribuir con datos para ésta sección:

- Bionomic Industries, Inc (Mahwah, NJ)
- Croll-Reynolds (Westfield, NJ)
- Misonix, Inc. (Farmingdale, NY)

## Referencias

- [1] *Schiffner, K.C. and H.E. Hesketh, Wet Scrubbers (2nd Edition), Technomic Publishing, Lancaster, PA, 1996.*
- [2] *Davis, W.T. Ed., Air Pollution Engineering Manual (2nd Edition), Air and Waste Management, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.*
- [3] *Environmental Protection Agency, U.S. (EPA), "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate", EPA Document No. EPA-452/R-97-001, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, September 30, 1997.*
- [4] *Wark, K., C.F. Warner, and W.T. Davis, Air Pollution: Its Origin and Control (3rd Edition), Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.*
- [5] *Cooper, C.D. and F.C. Alley, Air Pollution Control: A Design Approach, Waveland Press, Inc., Prospect Heights, IL, 1994.*
- [6] *Environmental Protection Agency, U.S. (EPA), Air Pollution Technology Fact Sheet, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, 1990.*
- [7] *Avallone, E. and T. Baumeister, Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers, McGraw Hill, New York, 1996.*
- [8] *The Scrubber Manual (Revised), The McIlvaine Company, Northbrook, IL, 1995.*

- [9] *Advanced Air Technologies, Inc., technical information on scrubbers, [www.aatinc.com/scrubbing\\_zone.htm](http://www.aatinc.com/scrubbing_zone.htm), 2002.*
- [10] *William L. Heuman, Industrial Air Pollution Control Systems, McGraw-Hill, Washington D.C., 1997.*
- [11] *"Air Pollution Control Systems for Boilers and Incinerators", U.S. Army Technical Manual, TM 5-815-1/AFR 19-6, May 9, 1998.*
- [12] *Vatavuk, William, Estimating Costs of Air Pollution Control, Lewis Publishers, Chelsea Michigan, 1990.*
- [13] *Cheremisinoff, Paul. N., Ed., Air Pollution Control and Design for Industry, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.*
- [14] *Theodore, Louis and Anthony Buonicore, Ed., Air Pollution Control Equipment: Selection, Design, Operation, and Maintenance, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.*
- [15] *Calvert, S., J. Goldsmith, G. Leith, and D. Metha, "Scrubber Handbook", NTIS, Springfield, VA, 1972*
- [16] *Hesketh, H.E., "Fine Particulate Collection Efficiency Related to Pressure Drop, Scrubbant and Particle Properties, and Contact Mechanisims," Journal of Air Pollution Control Association, vol. 24, no. 10, 1974.*
- [17] *Lapple, C.E. and H.J. Kamack, "Performance of Wet Dust Scrubbers", Chemical Engineering Progress, vol. 51, March 1955.*
- [18] *Semrau, K.T., "Dust Scrubber Design - A Critique on the State of the Art," Journal of Air Pollution Control Association, vol.13, December 1963.*
- [19] *Semrau, K.T., "Practical Process Design of Particulate Scrubbers", in Industrial Air Pollution Engineering, V. Casaseno, ed., McGraw Hill, New York, 1980.*

- [20] *“Scrubber Selection Guide”*, Calvert Environmental Equipment, San Diego, 1988.
- [21] *Schnelle, Karl B. Jr. and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook*, CRC Press, Washington D.C., 2002.
- [22] *Schiffner, Kenneth C. Air pollution Control Equipment Selection Guide*, Lewis Publishers, Washington D.C., 2002.
- [23] *Calvert, S., How to choose a particulate scrubber*, *Chem. Eng.*, 54-68, August 29, 1977.
- [24] *Correspondencia personal de Ken Schiffner of Bionomic Industries, Inc., a Paula Hemmer, E.H. Pechan and Associates, Inc., June, 2002.*

## TECHNICAL REPORT DATA

(Please read Instructions on reverse before completing)

1. REPORT NO. <b>452/B-02-002</b>	2.	3. RECIPIENT'S ACCESSION NO.
4. TITLE AND SUBTITLE  <b>Manual de Costos de Control de Contaminacion del Aire de la EPA</b>	5. REPORT DATE <b>July, 2002</b>	
	6. PERFORMING ORGANIZATION CODE	
7. AUTHOR(S) <b>Daniel Charles Mussatti</b>	8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO.	
9. PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS <b>U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Standards and Strategies Division Innovative Strategies and Economics Group Research Triangle Park, NC 27711</b>	10. PROGRAM ELEMENT NO.	
	11. CONTRACT/GRANT NO.	
12. SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS  <b>Director Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711</b>	13. TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED <b>Final</b>	
	14. SPONSORING AGENCY CODE <b>EPA/200/04</b>	
15. SUPPLEMENTARY NOTES <b>Updates and revises EPA 453/b-96-001, OAQPS Control Cost Manual, fifth edition (in English only)</b>		
16. ABSTRACT <b>In Spanish, this document provides a detailed methodology for the proper sizing and costing of numerous air pollution control devices for planning and permitting purposes. Includes costing for volatile organic compounds (VOCs); particulate matter (PM); oxides of nitrogen (NOx); SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, and other acid gases; and hazardous air pollutants (HAPs).</b>		
17. KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS		
a. DESCRIPTORS	b. IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS	c. COSATI Field/Group
<b>Economics Cost Engineering cost Sizing Estimation Design</b>	<b>Air Pollution control Incinerators Absorbers Adsorbers Filters Condensers Electrostatic Precipitators Scrubbers</b>	
18. DISTRIBUTION STATEMENT  <b>Release Unlimited</b>	19. SECURITY CLASS ( <i>Report</i> ) <b>Unclassified</b>	21. NO. OF PAGES <b>1,400</b>
	20. SECURITY CLASS ( <i>Page</i> ) <b>Unclassified</b>	22. PRICE