

#### 5.4) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS GASEOSOS

En la industria, los contaminantes atmosféricos se generan a partir de los procesos de combustión, procesamiento químico o biológico, o durante la transformación de las materias primas. Existen dos mecanismos generales para abatir la carga contaminante de las emisiones gaseosas, a saber:

- Separar los contaminantes de aquellos gases inofensivos y transferirlos a fase líquida o sólida
- Convertir los contaminantes en productos inocuos que puedan descargarse en la atmósfera con mínimo impacto ambiental

En el primer caso, se retira el contaminante de la fase gaseosa, mediante procesos físicos y físico-químicos tales como absorción, adsorción, precipitación o sedimentación. De este modo, se genera una nueva línea residual que requiere atención. Tal es el caso de la eliminación de material particulado mediante ciclones o precipitadores electrostáticos, donde se obtiene un sólido residual formado por las partículas retiradas de la fase gaseosa.

Por otra parte, los sistemas de depuración basados en procesos químicos incluyen reacciones de oxidación y reducción para transformar el contaminante original en un compuesto inocuo. El sistema más utilizado se basa en la oxidación del contaminante utilizando aire. Por ejemplo, los compuestos orgánicos volátiles pueden ser transformados en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  mediante combustión. Si hay presencia de S (por ejemplo, en los mercaptanos) y N (por ejemplo, aminas) en las moléculas orgánicas, se forma también  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  como producto de combustión, respectivamente. En los procesos de transformación química se debe evitar a toda costa la formación de compuestos residuales de mayor impacto que los contaminantes originales. Por ejemplo, la combustión de compuestos clorados puede generar compuestos volátiles tóxicos y corrosivos.

En la práctica, los sistemas de depuración de gases presentan una combinación de operaciones unitarias destinadas a eliminar los diferentes contaminantes de la corriente residual, en forma secuencial. Por ejemplo:

1. Eliminación de material particulado de mayor tamaño, mediante ciclones.
2. Eliminación de material particulado fino, mediante filtros de alta eficiencia o precipitadores electrostáticos.
3. Eliminación de  $\text{SO}_2$ , mediante absorción alcalina o adsorción con limonita.
4. Eliminación de compuestos orgánicos volátiles (por ejemplo, compuestos odoríferos), mediante combustión a alta temperatura.

A continuación, se revisa los principales sistemas de tratamiento de residuos gaseosos de origen industrial.

### 5.4.1) Sistemas Para Remoción de Material Particulado

Si la corriente gaseosa residual contiene material particulado, se puede utilizar métodos de separación de sólidos de las corrientes gaseosas, tales como ciclones, filtros, precipitadores electrostáticos y lavadores.

#### a) Ciclones

Son ampliamente utilizados para capturar cenizas y polvos. Se basan en la acción de la fuerza centrífuga sobre la partícula. Están formados por un cuerpo principal cilíndrico-cónico, donde los gases son alimentados tangencialmente (Figura 5.8). Al interior del equipo se forman dos vórtices: uno periférico (descendente) y otro central (ascendente). Las partículas más pesadas son lanzadas hacia las paredes, depositándose en la parte inferior del cono. El resto del gas forma un vórtice central, que circula hacia arriba y sale por la parte superior del cilindro.

La capacidad de separación del ciclón aumenta con la velocidad tangencial de alimentación. El factor de separación ( $S$ ) depende de la velocidad tangencial ( $v_T$ ) y del diámetro del cilindro ( $d$ ) de acuerdo a:

$$S = \frac{2v_T^2}{dg}$$

Los parámetros típicos para ciclones convencionales son  $d = 30$  cm y  $v_T = 15$  (m/s). En la práctica, el valor de  $S$  varía en el rango 10-2.500, siendo menor en aquellos sistemas de mayor diámetro y menor pérdida de carga. Los sistemas de ciclones de alta eficiencia generalmente contienen varios cilindros de diámetro pequeño, normalmente, entre 10 y 25 cm, instalados en paralelo.

La pérdida de carga ( $\Delta P$ ) representa un importante parámetro en el diseño de un ciclón y se puede estimar en base a:

$$\Delta P = \frac{K F_G^2 P \rho_G}{T_G}$$

donde  $K$  es un parámetro empírico que depende del diámetro del ciclón,  $P$  es la presión absoluta,  $F_G$ ,  $\rho_G$  y  $T_G$  son el flujo volumétrico, la densidad y la temperatura del gas, respectivamente. Las pérdidas de carga son menores a mayores diámetros. Al duplicar el diámetro del ciclón, la pérdida de carga se reduce en un factor de 10. En la Tabla 5.3 se compara la capacidad de separación de los ciclones convencionales y los de alta eficiencia, para diferentes rangos de tamaño de partículas.

**TABLA 5.3: COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SEPARACIÓN ENTRE CICLONES CONVENCIONALES Y DE ALTA EFICIENCIA**

<i>Tamaño de Partícula</i>	<b>SÓLIDOS REMOVIDOS (% EN PESO)</b>	
	<b>Ciclón Convencional</b>	<b>Ciclón de alta eficiencia</b>
< 5 $\mu\text{m}$	< 10 %	40-70 %
5-20 $\mu\text{m}$	50-60 %	80-95 %
20-40 $\mu\text{m}$	80-95 %	95-99 %
> 40 $\mu\text{m}$	95-98 %	> 99%

La principal ventaja de los ciclones radica en su gran sencillez de construcción y bajos costos de instalación, operación y mantención; además, permiten recuperar los sólidos secos. Sin embargo, pueden sufrir deterioro debido a la circulación de sólidos abrasivos a alta velocidad, y presentan una baja eficiencia de remoción para granulometrías pequeñas (menores de 10  $\mu\text{m}$ ).

#### **b) Filtros**

Son ampliamente utilizados a escala industrial. El gas se hace circular a través de la unidad filtrante, donde los sólidos quedan retenidos. A medida que la operación transcurre, se forma una película de sólidos que incrementa la capacidad de filtración, pero que aumenta progresivamente la pérdida de carga. Por lo tanto, los filtros deben ser limpiados periódicamente, ya que una vez que se colmatan, la pérdida de carga puede ser 10 veces mayor que la del filtro limpio.

Los sistemas de limpieza incluyen: Sistemas mecánicos por vibración, uso de aire en contracorriente y choques de aire comprimido. Generalmente, los filtros se diseñan en módulos separados, de modo que algunos mantengan su operación, mientras otros se someten a limpieza. Como medio filtrante, se utilizan filtros de fibras naturales (lana, algodón) y fibras sintéticas (poliéster, polipropileno, poliamida, PVC, fibra de vidrio). Los factores que determinan su selección son: costos, permeabilidad al aire, resistencia mecánica, resistencia contra ácidos y álcalis, hidrofobicidad y resistencia a altas temperaturas.

Se puede lograr altas eficiencias de depuración, llegando a remover el 100% de las partículas de 1  $\mu\text{m}$ . Además, se recupera el producto seco y no se generan efluentes líquidos. Sin embargo, su uso está restringido por las altas temperaturas (generalmente, hasta un máximo de 250°C para la fibra de vidrio) y los peligros de explosiones e incendios en el caso de polvos de alta combustibilidad. Son mucho más caros que los ciclones.

#### **c) Precipitación electrostática**

Se basa en la acción de un campo eléctrico sobre las partículas sólidas cargadas eléctricamente. Las partículas son cargadas mediante una corriente de electrones que circula entre los electrodos por efecto corona, gracias al alto voltaje existente entre ellos (del orden de 60 kvolts DC). Las partículas son atraídas hacia electrodos

colectores, donde se depositan y separan del resto de la corriente gaseosa. El gas fluye en dirección paralela a los electrodos (Figura 5.9).

Son altamente eficientes para remover partículas de tamaño pequeño, incluso menores de 1  $\mu\text{m}$  y presentan mínimas pérdidas de carga. Puede recolectar más del 99% de las cenizas de los gases de combustión.

**TABLA 5.4: EFECTO DEL TAMAÑO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA EFICIENCIA DE LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS**

TAMAÑO DE PARTÍCULA	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
< 5 $\mu\text{m}$	70-80 %
5-20 $\mu\text{m}$	95-99 %
20-40 $\mu\text{m}$	100 %
> 40 $\mu\text{m}$	100 %

El área total de los electrodos colectores,  $A$ , se puede estimar a partir de la relación de Deutsch-Anderson:

$$A = \frac{F}{v} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

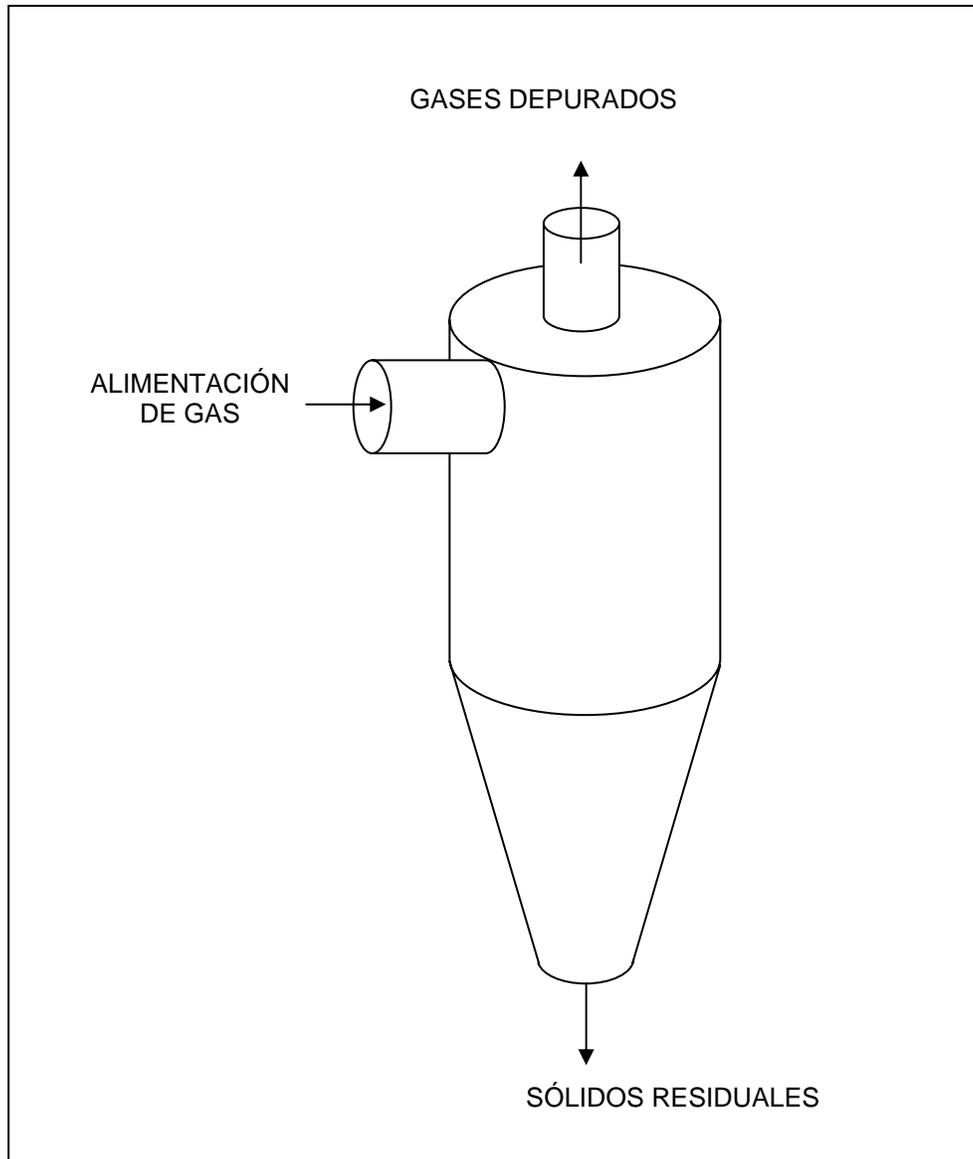
Donde:

$\eta$  = es la eficiencia de remoción (expresada como fracción en peso de sólidos recolectados).

$F$  = es el flujo volumétrico de gas a través del electrofiltro ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$V$  = es la velocidad de la partícula hacia el electrodo (se debe obtener empíricamente; generalmente, es del orden de 0,1 (m/s)

Se puede observar que el área de los colectores es muy sensible a la eficiencia requerida. Así, para aumentar la eficiencia de remoción de 90 a 99 % se debe duplicar el área de electrodos colectores, mientras que para aumentar de 90 a 99,9%, se requiere triplicar dicha área. El área transversal de la carcasa debe ser tal que la velocidad media del gas esté dentro del rango 0,7 – 2,5 (m/s). Las principales desventajas de estos equipos radican en su pérdida de eficiencia frente a condiciones variables de temperatura, flujo y composición del gas. Además, la presencia de partículas de alta resistividad afecta negativamente la eficiencia de recolección.



**FIGURA 5.8: CICLÓN PARA ELIMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN GASES**

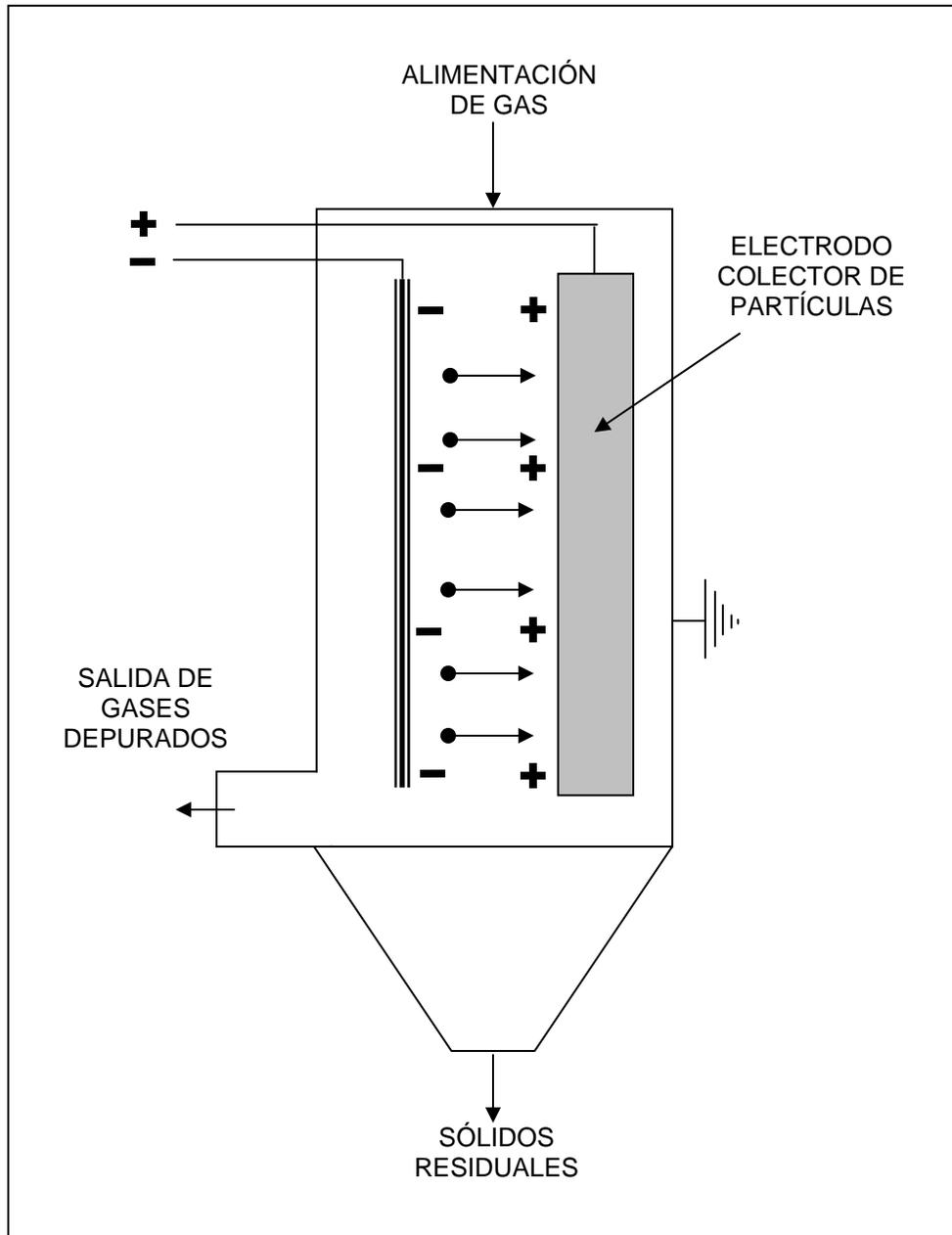
Si la cantidad de finos es muy grande, es conveniente instalar primero un ciclón antes del precipitador electrostático, para reducir la acumulación de material particulado al interior del equipo. Los precipitadores electrostáticos son muy caros y tienen costos de operación elevados, debido a los altos requerimientos de energía eléctrica. Finalmente, este tipo de equipos no es recomendable cuando se tiene presencia de compuestos combustibles o explosivos.

#### **d) Lavadores con líquido (*scrubbers*)**

Aquí se incluyen diversos equipos basados en la eliminación del material particulado, mediante el uso de un líquido absorbente. Cualquier compuesto gaseoso que sea soluble en dicho líquido, también puede ser removido de la corriente gaseosa principal. Ello representa una ventaja sobre los sistemas de depuración secos, descritos en secciones anteriores. Además, no presentan limitaciones debido a la presencia de compuestos combustibles y explosivos, y tienen mayor tolerancia a variaciones de la temperatura del gas. Sin embargo, la principal desventaja se debe a la generación de un residuo líquido que contiene el contaminante removido del gas. En general, los costos globales de tratamiento utilizando estos sistemas son altos cuando se requiere una alta eficiencia de depuración.

Los diferentes diseños varían de acuerdo a la forma como se efectúa el contacto entre la corriente gaseosa que contiene el material particulado y el líquido lavador. Entre estos se destacan:

- *Torres de aspersion:* El líquido se alimenta en la parte superior en forma de lluvia, el que entra en contacto en contracorriente con el gas que circula hacia arriba. Generalmente, gran parte del líquido se recircula. Mientras menor sea el tamaño de las gotas de líquidos, mayor es el área de contacto, con una mayor eficiencia de remoción de partículas sólidas. Se puede remover eficientemente partículas de pequeño tamaño, en el rango 1-2  $\mu\text{m}$ .
- *Lavadores ciclónicos:* El gas se alimenta en forma tangencial, en forma similar a los ciclones secos. El agua de lavado se alimenta en forma de pequeñas gotas desde la parte superior del equipo (o desde los lados hacia el centro). De este modo, se combina el efecto de la fuerza centrífuga y el impacto entre el sólido y el líquido.



**FIGURA 5.9: ESQUEMA DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO**

*Lavadores inerciales (Venturi):* El gas se hace pasar a través de una contracción donde aumenta su velocidad. En el punto donde la velocidad alcanza un valor máximo, se inyecta agua de lavado, la que se dispersa en múltiples gotas de pequeño tamaño, generando una gran área de contacto. El material particulado choca violentamente con las gotas de agua. La eficiencia de depuración depende directamente de la velocidad del gas, la que se debe mantener al máximo valor posible. Este tipo de lavadores tiene una mayor eficiencia de remoción de material particulado que los otros diseños, alcanzando valores superiores a 99% para partículas de 1  $\mu\text{m}$  y 90-95% para tamaños menores de 1  $\mu\text{m}$ . Debido a la gran pérdida de carga que se produce, los costos de operación son más altos que para los otros tipos de lavadores.

#### 5.4.2) Sistemas para la Remoción de Compuestos Gaseosos

Los compuestos gaseosos contenidos en el gas residual, tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, ácido sulfídrico, amoníaco y compuestos odoríferos (mercaptanos y aminas volátiles), pueden ser eliminados en base a diferentes tipos de procesos físicos y químicos. A continuación, se describen los principios y aplicaciones de tales procesos.

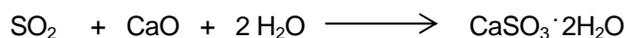
##### a) Procesos Basados en Absorción (*scrubbers*)

Si el compuesto gaseoso es soluble en un líquido, se puede absorber y retirarlo en solución líquida. El agua es el medio absorbente más utilizado a escala industrial. En muchos casos, se agrega solutos al medio acuoso, tales como hidróxido de sodio o aminas, para incrementar la solubilidad del gas que se requiere absorber. Generalmente, se utiliza columnas de relleno para aumentar el área de contacto gas-líquido. Alternativamente, se pueden utilizar columnas de platos. El gas se hace circular en contracorriente con el líquido absorbente (Figura 5.10).

Estos procesos son utilizados en la eliminación de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y compuestos orgánicos volátiles de las corrientes gaseosas residuales. Ya que el contaminante solamente cambia de fase, en muchos casos el líquido residual debe ser tratado antes de su vertido final, para cumplir con las normas de control ambiental.

En algunos casos, los procesos basados en absorción se implementan con vistas a recuperar el contaminante y reprocesarlo. Por ejemplo, la absorción selectiva de  $\text{H}_2\text{S}$  para su utilización en la producción de azufre y sulfidrato de sodio. Ello implica agregar otras unidades para recuperar selectivamente el contaminante de interés.

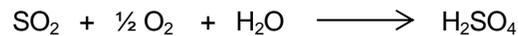
En aquellos sistemas de absorción para la remoción de  $\text{SO}_2$  de los gases residuales, se suele agregar  $\text{CaO}$  al líquido, lo que permite obtener sulfito de calcio de acuerdo a la reacción:



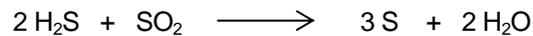
Como alternativa, se puede utilizar  $\text{CaCO}_3$  en vez de  $\text{CaO}$ . En ambos casos, se

obtiene un lodo residual rico en  $\text{CaSO}_3$ , el cual debe ser tratado antes de su vertido final. Generalmente, el tratamiento consiste en oxidar el  $\text{CaSO}_3$  a  $\text{CaSO}_4$  (yeso), ya que éste precipita con mayor facilidad y puede ser separado como residuo sólido o utilizado como materia prima para construcción.

También se puede utilizar  $\text{NaSO}_3$  como absorbente, el cual forma  $\text{NaHSO}_3$  en presencia de  $\text{SO}_2$ . Este se puede recuperar en forma concentrada, aplicando calor para producir su desorción, y ser utilizado para producir  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :



Alternativamente, el  $\text{SO}_2$  reacciona con  $\text{H}_2\text{S}$  para generar azufre en el proceso Claus:

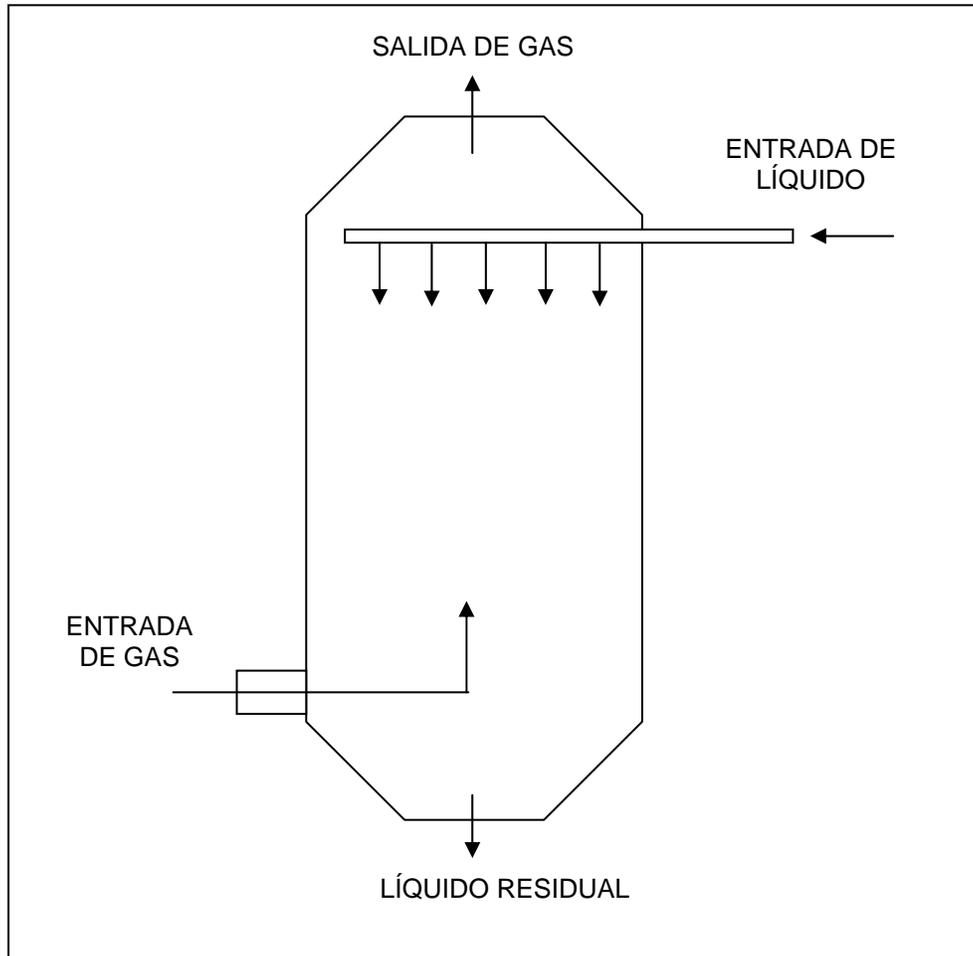


Este proceso es de mucho interés en las refinerías de petróleo ya que ambos compuestos representan un serio problema ambiental.

#### **b) Procesos Basados en Adsorción**

Se utiliza un sólido con capacidad para adsorber y retener selectivamente los compuestos que se desea retirar de la fase gaseosa. Como agentes adsorbentes se utilizan sólidos con alta superficie específica, como por ejemplo, carbón activado (del orden de  $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$ ). También se pueden utilizar zeolitas, que, a pesar de poseer un área específica menor (aproximadamente,  $200 \text{ m}^2/\text{g}$ ), presentan una estructura porosa adecuada. Los sistemas basados en adsorción varían de acuerdo al tipo de contacto existente entre la fase gaseosa y la fase sólida:

- *Sistemas de Lecho Fijo:* Se utiliza columnas rellenas con adsorbente y el gas circula continuamente a través del lecho. A medida que los sólidos adsorben los contaminantes, su capacidad de adsorción se reduce gradualmente, hasta alcanzar el punto de saturación. Cuando la eficiencia de depuración alcanza un nivel muy bajo, el adsorbente debe ser cambiado por adsorbente fresco o reconstituido. La reconstitución del adsorbente saturado se logra frecuentemente mediante tratamiento térmico con vapor sobrecalentado; sin embargo, el contaminante desorbido se transfiere al vapor de agua, lo que requiere tratamiento posterior (por ejemplo, incineración). Cuando se requiere mantener una operación continua, se debe tener una torre de reemplazo, de modo que ésta entre en operación mientras se procede a la reposición del adsorbente colmatado.
- *Sistema de Lecho Fluidizado:* Este sistema permite un contacto íntimo entre el sólido adsorbente y el gas. Se debe utilizar un sistema de separación sólido-gas para recuperar las partículas de material adsorbente arrastradas por el gas.



**FIGURA 5.10: SISTEMA DE ABSORCIÓN EN CONTRACORRIENTE**

### c) Sistemas Basados en Oxidación

Estos sistemas se utilizan para destruir compuestos susceptibles a ser oxidados a formas químicas de menor impacto ambiental, mediante reacciones de oxidación. Generalmente, el agente oxidante es el O<sub>2</sub> del aire.

La combustión es uno de los métodos más utilizados para eliminar compuestos orgánicos volátiles presentes en el gas. La oxidación de dichos contaminantes resulta en la formación de CO<sub>2</sub>, vapor de agua y óxidos de otros precursores oxidables presentes en la corriente gaseosa. En este sentido, se debe prevenir la formación de compuestos nocivos. Por ejemplo, la combustión de compuestos orgánicos clorados puede derivar en la producción de dioxinas, si las condiciones de operación no son controladas cuidadosamente.

Generalmente, el poder calorífico del gas no es suficientemente alto como para mantener una combustión autosustentada, por lo que se debe utilizar un combustible adicional (por ejemplo, propano, gas natural). Algunos de los sistemas más utilizados en la industria incluyen:

- *Antorchas:* Los sistemas de combustión por antorchas se pueden utilizar cuando los contaminantes a destruir se encuentran en concentraciones que están dentro de los límites de inflamabilidad de la mezcla. Se utiliza con frecuencia en las refinerías de petróleo y en plantas petroquímicas. En esos casos, se requiere un buen control de las condiciones de operación, ya que se debe minimizar la generación de humos, debido a la polimerización de hidrocarburos por craqueo a alta temperatura. Para mantener la temperatura de combustión a niveles inferiores a los de la temperatura de craqueo se puede inyectar vapor de agua, o se agrega aire como diluyente de la mezcla de gases.
- *Incineradores:* Son hornos a elevadas temperaturas generalmente calentados por llama directa por donde se hacen circular los gases a tratar. Se utiliza para destruir compuestos orgánicos volátiles. Los factores críticos que determinan la eficiencia de los incineradores son:
  - La temperatura de la cámara de combustión
  - El tiempo de residencia de los gases en la cámara
  - Las características hidrodinámicas del sistema
  - La cantidad de O<sub>2</sub> disponible

Estos factores son difíciles de controlar, sobre todo en situaciones donde la composición de la carga presenta alta variabilidad.

- *Oxidación Catalítica:* Existen hornos o reactores de oxidación que utilizan catalizadores para acelerar las reacciones de oxidación y mejorar la eficiencia del proceso. Normalmente, un reactor tubular contiene un catalizador sólido que adsorbe el gas y facilita su oxidación, a una temperatura más baja que en la combustión convencional. Permite eliminar compuestos orgánicos cuando estos se encuentran en pequeña concentración. Un ejemplo de este tipo de procesos

es la oxidación de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  utilizando  $\text{V}_2\text{O}_5$  como catalizador. El  $\text{SO}_3$  puede formar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en presencia de agua. En aquellos procesos que utilizan combustibles que tienen un significativa contenido de azufre, se puede llevar a cabo la combustión en un lecho fluidizado de  $\text{CaCO}_3$ , lo que facilita la oxidación del azufre a  $\text{CaSO}_4$  (yeso), minimizando así las emisiones de  $\text{SO}_2$ .

#### **d) Sistemas Basados en Reacciones de Reducción**

Estos se basan en reacciones químicas entre el contaminante y un agente reductor, que lo transforman en una forma química de menor impacto ambiental.

El gas residual se mezcla con una corriente con el gas reductor en un reactor a alta temperatura. Por ejemplo, para eliminar los  $\text{NO}_x$  se utiliza  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  o  $\text{CO}$  como agentes reductores, a temperaturas sobre  $900^\circ\text{C}$ , en presencia de catalizadores. Los  $\text{NO}_x$  generalmente se encuentran en baja concentración en las corrientes de gas residual, lo que dificulta su separación por absorción.

En el caso de los  $\text{NO}_x$  generados durante los procesos de combustión, la mayoría de las técnicas para su abatimiento se basan en el control de las condiciones de operación. En los sistemas de combustión, gran parte de los  $\text{NO}_x$  se forman a partir de la reacción entre el  $\text{N}_2$  y el  $\text{O}_2$  del aire a alta temperatura. Generalmente, se opera con un 10-20% de exceso de aire para asegurar una combustión completa y evitar la formación de  $\text{CO}$  e hidrocarburos volátiles; sin embargo, ello permite la oxidación del  $\text{N}_2$  que resulta en la formación de  $\text{NO}_x$ . Al reducir dicho exceso de aire, se puede reducir la emisión de  $\text{NO}_x$ . Los sistemas de combustión en dos etapas (con dos cámaras de combustión en serie) también son usados con tales fines, ya que se puede usar una menor cantidad de aire para completar la combustión y, al mismo tiempo, mantener una menor temperatura de llama. La reducción de la temperatura de combustión tiene un gran efecto en prevenir la formación de  $\text{NO}_x$ . El diseño de los quemadores en las calderas modernas privilegia una menor temperatura de llama, con tales fines.

#### **5.4.3) Descarga de los Gases Residuales a la Atmósfera**

Las descargas gaseosas derivadas de la combustión y de los sistemas de depuración de gases, se hacen a través de chimeneas, las que no solamente ayudan a mantener el flujo de gases, sino que permiten dispersar los gases en la atmósfera. Tales emisiones deben respetar las normas de calidad de aire, por lo que la altura y diámetro de la chimenea deben ser cuidadosamente diseñados, tomando en consideración los factores meteorológicos locales. Para tales efectos, se utilizan modelos de dispersión, tales como aquellos descritos en el Capítulo 3.