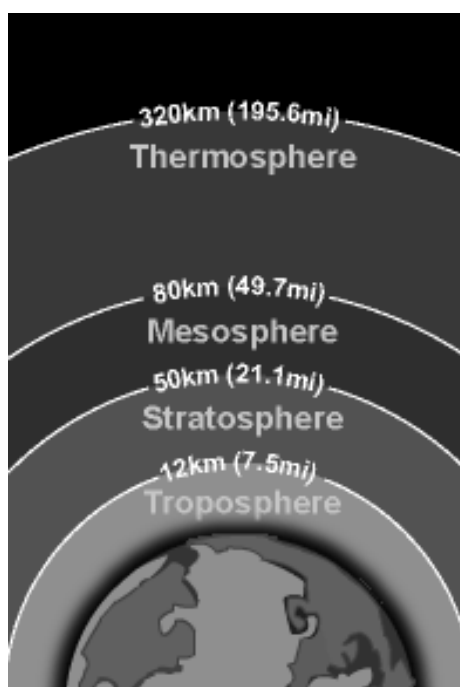




Tema 6 -Contaminación Atmosférica

Atmósfera: Estructura y composición

La atmósfera es la capa gaseosa de espesor aproximadamente uniforme que rodea nuestro planeta y que hace posible la vida en él.



Componente	% volumen
N ₂	78.03%
O ₂	20.99%
CO ₂	0.03%
Ar	0.94%
Ne	0.00123%
He	0.0004%
Kr	0.00005%
Xe	0.000006%
H ₂	0.01%
CH ₄	0.0002%
N ₂ O	0.00005%
H ₂ O(v)	Variable
O ₃	Variable
Partículas	Variable

Concepto de Contaminación Atmosférica

- Presencia en la atmósfera de sustancias no deseables, en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que puedan afectar significativamente al **confort, salud y bienestar** de las personas o al uso y disfrute de sus propiedades. (**American Society for Testing Materials, ASTM**).
- Contaminante:** cualquier sustancia introducida directa o indirectamente por el hombre en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos sobre la salud humana o el medio ambiente en su conjunto. (DIRECTIVA 96/62/CE DEL CONSEJO DE EUROPA).

UNIDADES DE MEDIDA

mg/L

mg/m³

µg/m³

ng/m³

(1/10⁻⁶) → ppm

(1/10⁻⁹) → ppb

PARA CONVERTIR UNIDADES NECESITAMOS LAS CONDICIONES (P y T)!!

Clasificación de los contaminantes atmosféricos

1. Clasificación según el elemento químico característico

Partículas	<i>cenizas, aerosoles, etc.</i>
Compuestos de Azufre	<i>SO₂, SO₃, H₂S, SO₄²⁻ y mercaptanos</i>
Compuestos de Nitrógeno	<i>NO, NO₂, NO₃⁻, NH₃</i>
Compuestos de Carbono	<i>CO, CO₂</i>
VOCs	<i>hidrocarburos, aldehídos, etc.</i>
Ozono	<i>O₃, “smog fotoquímico”</i>
Halógenos	<i>HF, HCl, F⁻, Cl⁻</i>

2. Clasificación según su origen

- Primarios:** Son emitidos directamente a la atmósfera en su forma final. Ejemplos: partículas, SO₂, SH₂, NO, CO, CO₂, algunos compuestos orgánicos volátiles (VOCs), etc.
- Secundarios:** Se forman en la atmósfera mediante reacciones, generalmente fotoquímicas, a partir de los primarios: ozono, “smog fotoquímico”, NO₂, SO₃, etc.

Clasificación de los contaminantes atmosféricos

3. Clasificación según su estado físico

Gases	SO_2 , CO , CO_2 , NO , NO_2 , H_2S , NH_3 , O_3	
Vapores	<i>Hidrocarburos alifáticos y aromáticos, aldehídos, cetonas, alcoholes, ozónidos, peróxidos, mercaptanos</i>	
Partículas (Aerosoles)	Origen Humano	<i>Humo (formado por restos no quemados), cenizas, cemento, metales pesados, etc.</i>
	Marinos y minerales	<i>NaCl, sulfatos, SiO_2, Fe_2O_3, carbonatos, asbestos, etc.</i>

Efectos tóxicos más importantes de los productos químicos

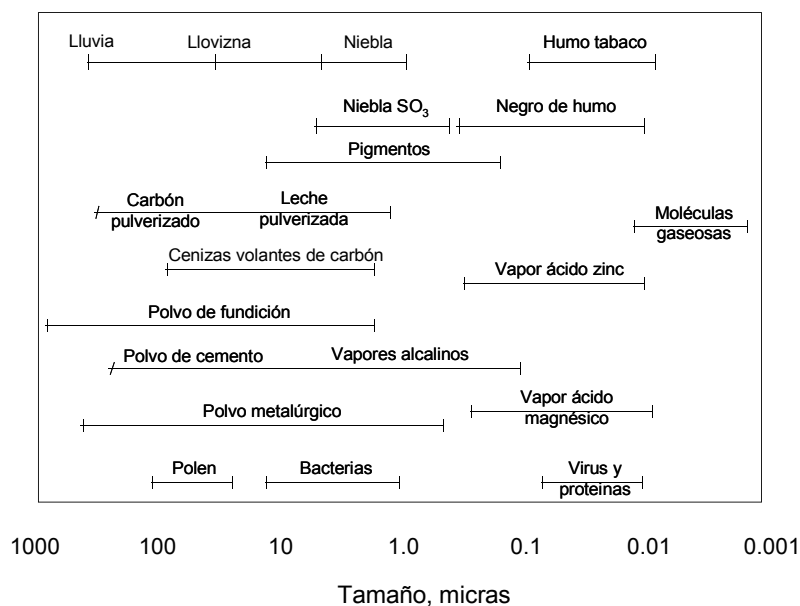
- 1. Irritantes:** Causan reacciones inflamatorias localizadas. Ácidos, bases, oxidantes, reductores.
- 2. Sensibilizantes:** No causan efecto aparente la primera exposición, pero sensibilizan al sistema inmune, y luego producen reacciones alérgicas en posteriores exposiciones. Ej: formaldehído.
- 3. Asfixiantes:** Interfieren en la respiración, ya sea reduciendo la cantidad de oxígeno ambiental (C_4H_{10}), o bien a nivel bronquial (CO)
- 4. Narcóticos y anestésicos:** Producen depresión del sistema nervioso central. Ej: cloroformo
- 5. Tóxicos sistémicos:** No provocan problemas la zona de contacto, pero sí en órganos concretos (Ej: etanol en el hígado)
- 6. Carcinógenos:** Pueden provocar cáncer (Ej: Benceno)
- 7. Causantes de fibrosis pulmonar:** Partículas finas, especialmente asbestos.

Clasificación de los contaminantes atmosféricos

Partículas	<i>cenizas, aerosoles, etc.</i>
Compuestos de Azufre	SO_2 , SO_3 , H_2S , SO_4^{2-} y <i>mercaptanos</i>
Compuestos de Nitrógeno	NO , NO_2 , NO_3^- , NH_3
Compuestos de Carbono	CO , CO_2
VOCs	<i>hidrocarburos, aldehídos, etc.</i>
Ozono	O_3 , “ <i>smog fotoquímico</i> ”
Halógenos	HF , HCl , F^- , Cl^-

(I) Partículas: Definición y tamaños

Materia dispersada que existe en fase condensada (sólida o líquida) con una constitución química muy variada y cuyo tamaño está comprendido entre 0.01 y 1000 μm . Pueden originarse por la actividad humana o por causas naturales.



Distribución de tamaños de material particulado en la atmósfera

(I) Partículas : Clasificación y efectos nocivos

Por su estado físico:

- a. **Polvo u Hollín:** Si son sólidas
- b. **Niebla o Neblina:** Si son líquidas

Si son partículas de tamaño < 100 micras (μm) se habla de “**aerosoles**”, independientemente de que se trate de sólidos o líquidos.

Por su composición:

- a. **Inertes:** formadas por residuos orgánicos e inorgánicos.
- b. **Vivas:** formadas por granos de polen, esporas y bacterias y en menor grado, algas, huevos de insectos, semillas, etc.

Efectos nocivos de las partículas:

1. Deposición sobre las superficies y vegetales
2. Problemas en las vías respiratorias cuya gravedad depende de la composición química y del tamaño. Las más pequeñas son las más peligrosas ya que permanecen más tiempo suspendidas en el aire y penetran con más facilidad y profundidad en las vías respiratorias.

(II) Compuestos de Azufre

Los compuestos de azufre que causan problemas más graves por su presencia en la atmósfera son:



- Gas incoloro y no inflamable, de olor fuerte e irritante.
- Se produce sobre todo en la combustión de carbón y petróleo y también en los procesos metalúrgicos. En la naturaleza, es emitido en la actividad volcánica
- Casi la mitad vuelve a depositarse en la superficie húmedo o seco y el resto se convierte en iones sulfato (SO_4^{2-}). Es un importante factor en la **LLUVIA ÁCIDA**



- Gas incoloro, inflamable y de olor desagradable (“a huevos podridos”). Es irritante a bajas concentraciones, y tóxico a concentraciones elevadas.
- Se produce en la naturaleza debido a la oxidación de la materia orgánica en condiciones anaerobias (zonas anóxicas en lagos y sedimentos). A nivel industrial su principal fuente es la industria petroquímica (desulfuración del crudo) y la papelera (proceso con sulfito). También se produce en la actividad volcánica y está presente en el gas natural.

(III) Compuestos de Carbono

CO

- Gas incoloro e inodoro, de elevada toxicidad. Es capaz de enlazarse fuertemente con la hemoglobina de la sangre, interfiriendo en la respiración a nivel pulmonar. Debido a su rápida difusión en ambientes abiertos, es en los recintos cerrados donde su peligrosidad es muy alta.
- Se origina en procesos de combustión con defecto de oxígeno (escape de los automóviles, combustiones industriales, calefacciones, humo de tabaco....)

CO₂

- Es el producto de las combustiones y la respiración celular y se encuentra en la atmósfera de forma natural, por lo que muchos no lo consideran realmente un contaminante.
- En la tierra existe un equilibrio entre el CO₂ fijado por los organismos fotosintéticos y el aportado por los seres vivos. Actualmente dicho equilibrio se está viendo afectado por la utilización masiva de combustibles fósiles y a la deforestación, por lo que su nivel en la atmósfera está creciendo alarmantemente durante los últimos decenios, (entre 2 y 3 ppm por año). Este aumento está provocando alteraciones climáticas (efecto invernadero) y perturbaciones en el desarrollo de los seres vivos.

(IV) Compuestos de Nitrógeno

NO_x (óxidos de nitrógeno)

- Presentes de forma natural en la atmósfera, aunque en concentraciones extraordinariamente bajas. Como contaminantes proceden de las combustiones a alta temperatura (industriales, vehículos), fabricación de HNO₃ y H₂SO₄.
- El dióxido de nitrógeno (NO₂) es irritante y tiene efectos nocivos sobre el aparato respiratorio. Normalmente se produce por oxidación del óxido nítrico (NO), que es el emitido en la combustión.
- El problema que plantean en la atmósfera es que en presencia de vapor de agua forman HNO₃ contribuyendo de esa forma a la lluvia ácida. Además intervienen en la formación de ozono troposférico formación de nieblas ('smog fotoquímico').

NH₃

- Es un gas incoloro de característico olor penetrante y desagradable.
- Es cáustico e irritante, y a concentraciones elevadas puede causar daños en ojos, garganta y pulmones.
- Presenta habitualmente concentraciones muy bajas en la atmósfera, aunque se pueden presentar niveles elevados de carácter ocasional, cuyo origen procede de escapes en la industria de fabricación de abonos, ácido nítrico o productos orgánicos.

(V) Otros importantes contaminantes atmosféricos

O₃

- Se encuentra presente de forma natural en la atmósfera, particularmente en la estratosfera, donde se forma por reacciones fotoquímicas y actúa como filtro de la radiación ultravioleta, desempeñando un papel esencial para la vida en la tierra.
- Sin embargo, en la troposfera su presencia por encima de ciertos niveles (0.01 – 0.03 ppm) es perjudicial ya que es un poderoso oxidante, que puede causar daños e irritaciones en garganta y pulmones.
- El ozono troposférico se origina de forma natural en las tormentas. También aparece como consecuencia de la actividad humana, pero no de forma directa, ya que se origina a partir de los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) mediante reacciones fotoquímicas (formación del “smog fotoquímico”).

Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs)

- Son sustancias orgánicas (hidrocarburos, aldehídos, alcoholes, etc.) de elevada volatilidad, y que escapan a la atmósfera en forma de gas.
- Las principales fuentes de emisión son las industrias del petróleo y del gas natural, así como el tráfico (motores de explosión).
- Tienen un efecto directo sobre la salud (los aldehídos producen fuerte irritación en los ojos), y además son precursores de otros contaminantes como el “smog fotoquímico”.

Fuentes de la contaminación atmosférica

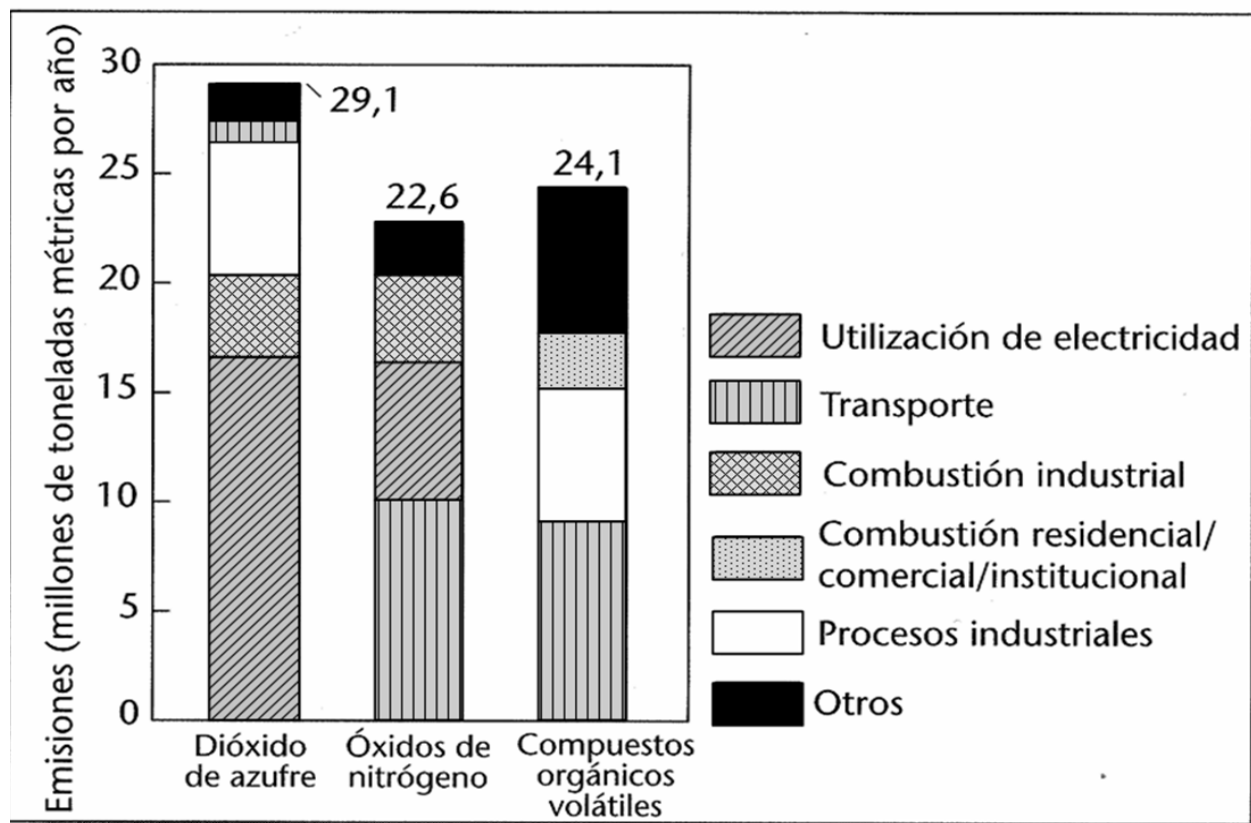
1. Fuentes de producción de energía:

- Producción de energía eléctrica: plantas térmicas y nucleares.
- Producción de energía mecánica: transportes (los automóviles plantean graves problemas de contaminación en las ciudades).
- Producción de energía calorífica: generadores de calor domésticos e industriales, plantas incineradoras de residuos sólidos

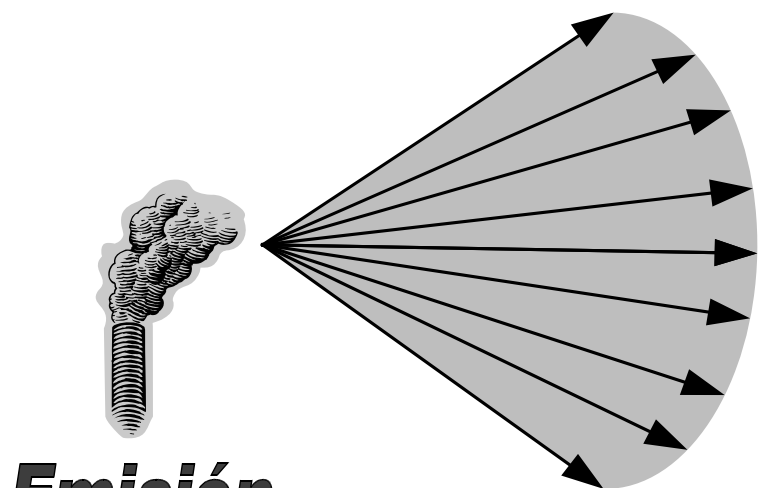
2. Fuentes de producción de bienes materiales:

Cualquier industria que de una u otra forma pueda realizar emisiones contaminantes a la atmósfera. Esto implica que la naturaleza de los contaminantes emitidos sea muy dispar.

Fuentes de la contaminación atmosférica



Distribución de los contaminantes en la atmósfera



Emisión

Difusión



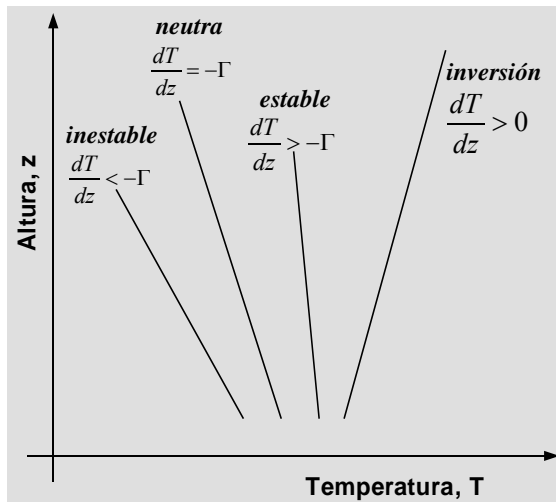
Inmisión

- Factores meteorológicos: velocidad del viento, gradiente de temperatura, humedad, etc.
- Factores específicos del foco emisor: velocidad de salida, temperatura, forma, tamaño, etc.

Factores que influyen en la dispersión de contaminantes en la atmósfera

A. Aspectos meteorológicos

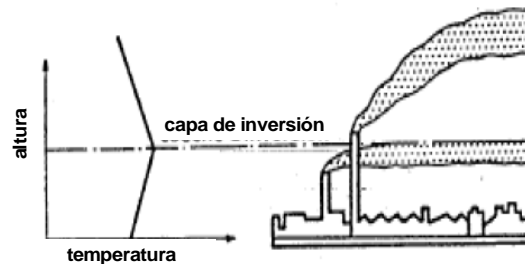
1. Temperatura



Γ es el gradiente adiabático seco = $-0.01^{\circ}\text{C}/\text{m}$

Las atmósferas inestables favorecen la dispersión de contaminantes, mientras que las estables la dificultan.

La situación más adversa es la aparición de capas de inversión, que actúan como barreras para la dispersión de contaminantes.



2. Viento

3. Topografía

4. Lluvia

Factores que influyen en la dispersión de contaminantes en la atmósfera

B. Aspectos del foco emisor

- 1. Naturaleza de los contaminantes:** la concentración máxima en el suelo se encuentra a una distancia del punto de emisión que varía con el estado físico del contaminante, gas o sólido, y en este último caso con la granulometría
- 2. Velocidad de emisión:** la chimenea representa un obstáculo para los vientos provocándose la aparición de torbellinos y una zona de baja presión alrededor de la chimenea que impide la elevación normal del penacho, por lo que para evitar la proyección hacia el suelo, 'downwash', es necesario imprimir al gas una velocidad de salida de la chimenea de 2.5 veces la velocidad del viento.
- 3. Temperatura de emisión:** para que el penacho de humo ascienda por diferencia de densidad, la temperatura debe ser superior a la de la atmósfera circundante. Cuanto mayor sea la diferencia tanto mayor será el poder ascensional que debe ser suficiente para atravesar las capas de inversión que puedan existir.
- 4. Altura de la emisión:** es un aspecto fundamental para conseguir que los humos atraviesen las capas de inversión que estén a baja altura

Evaluación de la contaminación atmosférica

Los niveles de emisión e inmisión se encuentran regulados en la mayoría de los países mediante la especificación de límites máximos como:

1. **Concentración máxima de emisión, C.M.E.:** mayor cantidad de contaminante que una fuente está autorizada a emitir
2. **Concentración máxima de inmisión, C.M.I.:** suele estar acompañada del máximo periodo de tiempo en que se permite dicha concentración máxima
3. **Concentración máxima admisible, C.M.A.:** se define para ambientes laborales y representa en esencia un valor de inmisión pero que se diferencia de C.M.I. en:
 - Se aplica solamente a periodos de 8 horas de duración
 - Tiene en cuenta a una población generalmente homogénea
 - No considera daños potenciales a animales y plantas

Una vez fijados estos índices, para la evaluación de un problema de contaminación hay que distinguir, según el ámbito en que se produce el fenómeno, entre dos tipos:

1. **Atmósfera de interiores**
2. **Atmósfera libre**

Control de la contaminación atmosférica (I)

1. Identificación de todas las fuentes de emisión:

- Si se trata de un proceso: Propias del proceso (directas) y posibles pérdidas accidentales (fugas, derrames, etc.). También deberán tenerse en cuenta las emisiones indirectas (purgas de tanques, puntos de muestreo, etc.)
- Si se trata de un fenómeno de contaminación asociado a fuentes múltiples (p. ej., contaminación urbana), deberán identificarse todas ellas y los posibles mecanismos que generan la situación de contaminación que se pretende controlar.

2. Fijación del límite de emisión

3. Selección de la estrategia de control

I. Métodos de depuración intrínsecos

Se basan en la filosofía de evitar la formación de contaminantes. En líneas generales se pueden recurrir a dos tipos de medidas:

- Modificaciones en los equipos, procesos y procedimientos
- Cambio en las materias primas o auxiliares empleadas

Hay que resaltar que, normalmente, este tipo de control de la contaminación ofrece la solución más adecuada y económica para reducir las emisiones

Control de la contaminación atmosférica (II)

II. Métodos de depuración extrínsecos:

Su objetivo es depurar el efluente contaminante **UNA VEZ PRODUCIDO**, para evitar su lanzamiento a la atmósfera. Es decir, que los métodos extrínsecos no son más que medidas correctoras una vez producido el efluente contaminante. Deben usarse en general como segunda opción, cuando no es posible aplicar métodos intrínsecos.

Para poder aplicarlos en primer lugar hay que **definir adecuadamente el problema de control**, es decir, conocer en profundidad las características del efluente a tratar (estado físico, caudal, concentración de la sustancia o material a ser retirado, distribución de tamaño de las partículas, posibles picos de caudal o carga contaminante, propiedades fisicoquímicas, presión y temperatura).

Una vez definido el problema se debe elegir el método de depuración adecuado, que en general pertenecen a dos grandes grupos, de acuerdo con la estrategia en que están basados

- Concentrar y retener: utilización de equipos depuradores
- Diluir y expulsar.

Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

A. Separación de partículas (sólidas y líquidas):

Cámaras de Sedimentación

Fundamento

Se reduce la velocidad del aire para provocar la sedimentación de las partículas.

Aplicaciones

Separación de partículas > 50 micras. Se utiliza para limpieza preliminar, al objeto de reducir la carga de partículas.

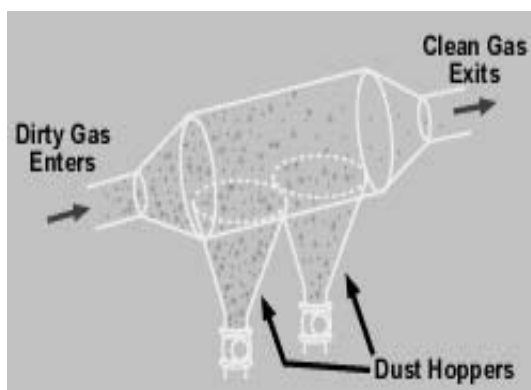
Ejemplos: Industria de refino de metales, plantas generadoras de calor y electricidad. Son particularmente útiles cuando se requiere además enfriar la corriente de gas.

Ventajas

Construcción muy sencilla y bajo precio.

Inconvenientes

Muy baja eficacia y ocupan mucho espacio.



Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

Ciclones

Fundamento

Son separadores de inercia, que se basan en que las partículas poseen una cantidad de movimiento mucho mayor que el gas, por lo que no siguen el mismo camino que éste si la dirección del movimiento varía súbitamente. Los ciclones imparten una fuerza centrífuga a la corriente de gas.

Aplicaciones

Partículas de diámetro mayor de 10 micras. Ciclones de alta eficiencia son efectivos para diámetros hasta 2.5 micras.

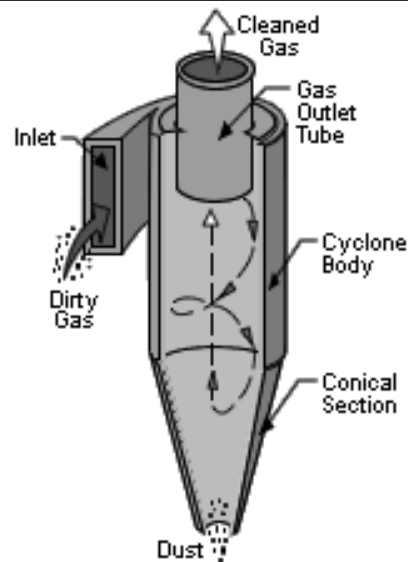
Ejemplos: En tareas de control de la contaminación se usan como pre-limpiadores.

Ventajas

Bajo coste y escaso requerimiento de espacio.

Inconvenientes

Eficacia relativamente baja. No pueden manejar material con tendencia a aglomerarse.



La fuerza centrífuga impulsa a las partículas contra la pared. Tras impactar se deslizan descendiendo hasta una tolva situada en la parte inferior, donde se recogen y separan de la corriente gaseosa. La corriente gaseosa limpia asciende axialmente hasta salir por la parte superior

Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

Precipitadores electrostáticos

Fundamento

Utilizan fuerzas eléctricas para movilizar las partículas arrastradas por una corriente hacia las superficies de recolección.

Aplicaciones

Partículas de diámetro menor de 10 micras. Son también efectivos para diámetros inferiores a 2.5 micras y nieblas ácidas.

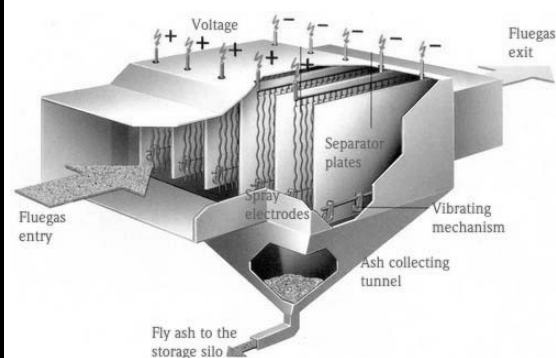
Ejemplos: Industria textil, papelera, metalúrgica, en los incineradores de residuos peligrosos, y en la producción de ácido sulfúrico, entre otros.

Ventajas

Eficiencias muy altas, aún con partículas pequeñas. Caída de presión muy reducida. Costos de operación bajos.

Inconvenientes

Inversión inicial alta. Son muy sensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas. Requieren mucho espacio. No son adecuados para gases combustibles, por el riesgo de explosión.



En el PE del tipo placa-alambre, el flujo de la emisión gaseosa fluye horizontalmente y paralelo a las placas verticales de láminas de metal. Usados normalmente con polvos

Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

Filtros

Fundamento

Las partículas son separadas mediante la interposición de un material filtrante, permeable para los gases e impermeable para las partículas.

Aplicaciones

Partículas de diámetro menor de 10 micras.

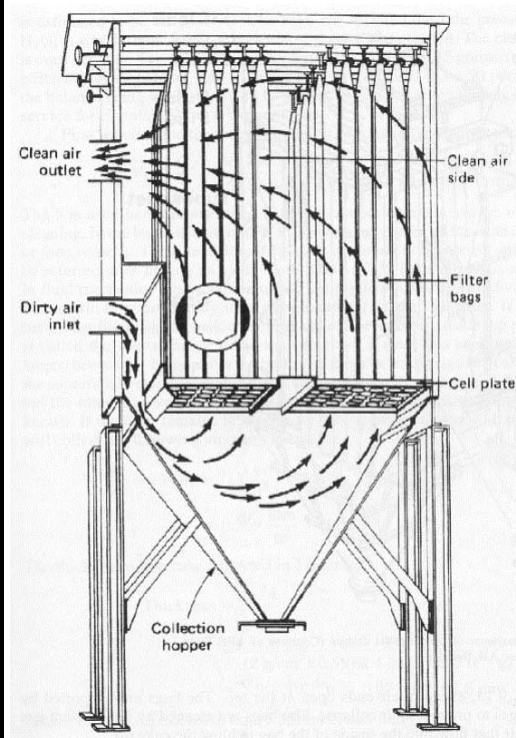
Ejemplos: Usados tradicionalmente para la eliminación de finos y humos así como en la industria cementera y en la molienda de granos.

Ventajas

Proporcionan altas eficiencias de filtración tanto para partículas gruesas como finas. Relativamente insensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas. Operación relativamente simple.

Inconvenientes

Temperatura de operación limitada, debido al peligro de explosión o fuego por acumulación de polvo. No adecuados para ambiente húmedo. Elevada pérdida de carga



Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

Lavadores de Gases (Scrubbers)

Fundamento

Un líquido atomizado, generalmente agua, se usa para capturar y recolectar las partículas o bien para aumentar el tamaño de las gotas (en aerosoles). Permiten también la absorción de contaminantes gaseosos.

Aplicaciones

Son capaces de eliminar partículas pequeñas, en el intervalo de 0.1 a 20 micras. Su eficacia, sin embargo, disminuye para diámetro < 1 micra.

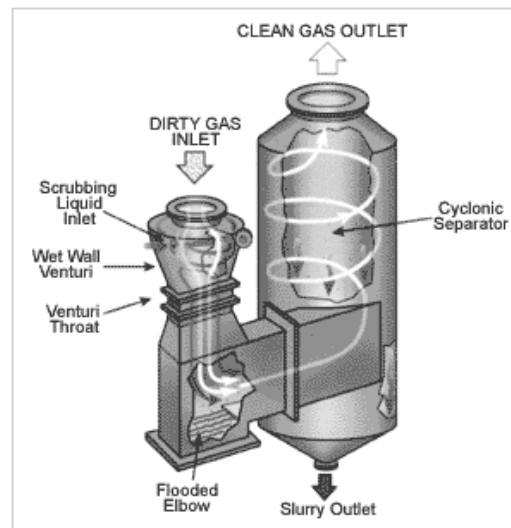
Ejemplos: Utilizados principalmente cuando se quiere recuperar el producto de la fase húmeda o cuando existe riesgo de explosión del polvo o gases inflamables.

Ventajas

Eliminan partículas muy pequeñas, tienen un funcionamiento simple y se pueden construir con materiales baratos, lo que los convierte en una alternativa a los precipitadores electrostáticos y los filtros de gases.

Inconvenientes

Altas pérdidas de carga en el gas y en el líquido, con el consiguiente consumo de energía. Necesitan tratamiento del agua de lavado para su descontaminación.



Los mecanismo de separación son el impacto inercial (cambios en la dirección del flujo de gas) y el choque directo de las partículas con las gotas de líquido.

Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

B. Separación de contaminantes gaseosos

Absorción

Fundamento

Los contaminantes son eliminados de la corriente gaseosa mediante su absorción (con o sin reacción química) en un líquido, generalmente agua a pH neutro o alcalino.

Aplicaciones

Eliminación de gases y vapores ácidos (HCl, HF, SiF₄, SO₂, Cl₂ y H₂S), usando agua pura o agua + NaOH ó Na₂CO₃ como disolvente. A veces se usan disolventes orgánicos para eliminar hidrocarburos y vapores orgánicos.

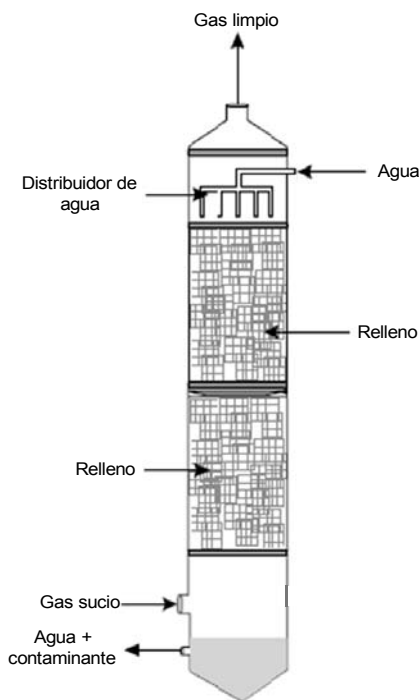
Ventajas

Especialmente indicada para vapores ácidos inorgánicos. Eficacia elevada (hasta el 95% para SO₂).

Inconvenientes

Aplicabilidad limitada. El agua utilizada en el proceso puede requerir posterior tratamiento.

Se usan diseños que permitan conseguir la máxima área posible de transferencia de materia: columnas de relleno (como la de la figura), columnas de pisos, torres de pulverización, etc.



Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

Adsorción

Fundamento

Los contaminantes son eliminados de la corriente gaseosa mediante su adsorción (física) en la superficie de sólidos granulares (carbón activo, alúmina activa, gel de sílice, tamices moleculares), que tienen la capacidad de retener las moléculas del contaminante.

Aplicaciones

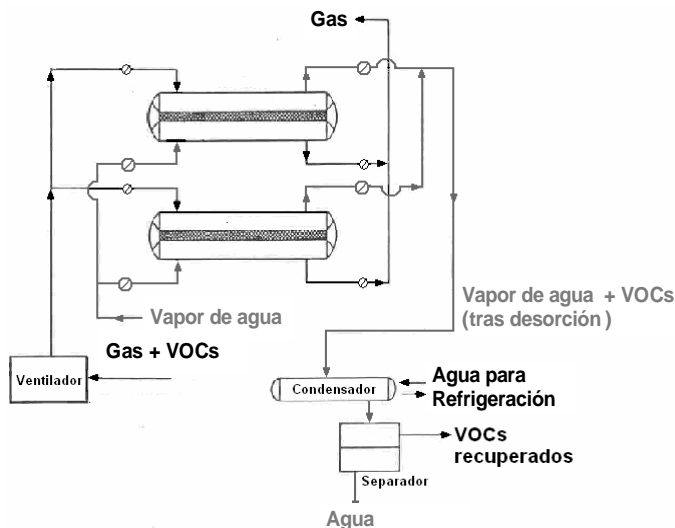
Eliminación de olores, hidrocarburos, fluorocarburos, compuestos orgánicos con azufre, disolventes y humedad.

Ventajas

Requiere una baja inversión de capital, y es muy adecuada para la recuperación de disolventes orgánicos. Eficacia elevada (hasta 95%).

Inconvenientes

Aplicabilidad reducida. Puede trabajar en condiciones de humedad y temperatura limitadas.



Sistema para eliminación de VOCs consistente en dos columnas de adsorción conectadas en paralelo. La regeneración (desorción) se realiza con vapor de agua.

Equipos para depuración de efluentes gaseosos (métodos extrínsecos)

Combustión

Fundamento

Los VOCs son oxidados mediante combustión (u oxidación térmica) para dar CO_2 y agua. Elementos traza, como azufre y cloro, se oxidan a SO_2 y HCl .

Aplicaciones

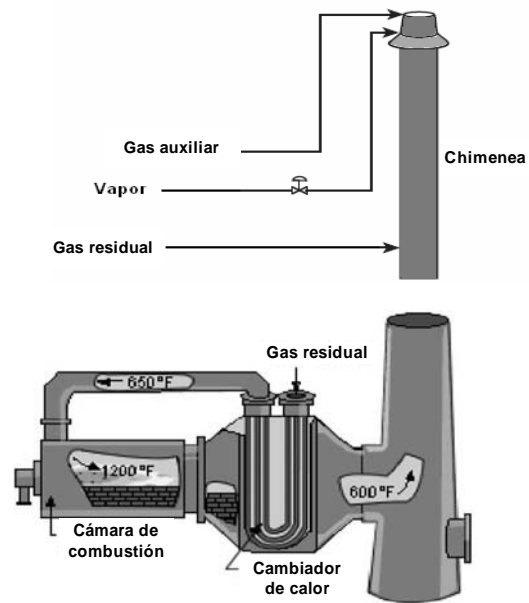
Fundamentalmente para la eliminación de compuestos orgánicos (VOCs) fácilmente oxidables. En función de las cantidades emitidas y de la concentración del contaminante se usan dos dispositivos: antorchas y hornos.

Ventajas

Alta eficacia en la destrucción de los compuestos orgánicos. Amplia aplicabilidad. Es posible la recuperación del calor.

Inconvenientes

No permite la recuperación de los contaminantes orgánicos. Pueden presentar problemas de seguridad o generarse otros contaminantes peligrosos si hay elementos diferentes de H, C y O en la emisión.



Para emisiones importantes y con grandes fluctuaciones en cuanto al caudal y concentración de contaminantes se usan antorchas (arriba). Para concentraciones de contaminante más pequeñas y continuas se emplean hornos (abajo).