



Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008

Módulo I: Contaminación Ambiental

# **CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

AUTOR: JOSÉ MANUEL CARNICER

## INDICE

<b>1.-INTRODUCCION .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.-CICLOS BIOGEOQUIMICOS .....</b>	<b>5</b>
1.1.1.-CICLO DEL AGUA.....	5
1.1.2.-CICLO DEL CARBONO.....	6
1.1.3.-CICLO DEL OXIGENO.....	7
1.1.4.- CICLO DEL AZUFRE.....	7
1.1.5.- CICLO DEL NITROGENO.....	8
<b>1.2.-ALTERACIONES DE LOS CICLOS BIOGEOQUIMICOS POR LAS ACTIVIDADES HUMANAS .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.- PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFERICOS Y EFECTOS QUE PRODUCEN. ....</b>	<b>10</b>
1.3.1.-AEROSOLES.....	11
1.3.2.-OXIDOS DE AZUFRE (SO <sub>x</sub> ).....	13
1.3.3.-MONOXIDO DE CARBONO (CO).....	15
1.3.4.-OXIDOS DE NITROGENO (NO <sub>x</sub> ).....	16
1.3.5.-HIDROCARBUROS (HC).....	17
1.3.6.-OZONO (O <sub>3</sub> ).....	17
1.3.7.-COMPUESTOS HALOGENADOS.....	18
1.3.8.- METALES TOXICOS.....	18
<b>1.4.- ALTERACIONES MACROECOLOGICAS .....</b>	<b>20</b>
1.4.1.- CONTAMINACION FOTOQUIMICA.....	20
1.4.2.- LLUVIAS ACIDAS.....	21
1.4.3.-ROTURA DE LA CAPA DE OZONO POR LOS COMPUESTOS ORGANO - HALOGENADOS (CLOROFLUORCARBONOS).....	22
1.4.4.- EFECTOS DE INCREMENTO DE LA CONCENTRACION DE CO <sub>2</sub> EN LA ATMOSFERA SOBRE EL CLIMA. EFECTO INVERNADERO.....	24
<b>2.-EMISIONES DE CONTAMINANTES. ....</b>	<b>24</b>
2.1.-CLASIFICACION SEGUN LAS CARACTERISTICAS.....	25
2.2.-FOCOS FIJOS.....	25
2.3.-FOCOS MOVILES.....	26
2.4.-FOCOS DE TIPO AREA (MULTI-FOCOS).....	26
<b>2.5.-OLORES EN EDAR: GENERACION, MEDIDA Y CORRECCION.....</b>	<b>26</b>
2.5.1.-INTRODUCCION.....	26
2.5.2.-¿QUÉ ES EL OLOR?.....	27
2.5.4.-FISIOLOGÍA DEL OLOR.....	28
2.5.5.-MEDIDA DEL OLOR.....	28
2.5.6.-OLOR E HIGIENE INDUSTRIAL.....	29
2.5.7.-OLORES EN LAS EDAR.....	32
2.5.8.-ELIMINACIÓN DE OLORES.....	32
<b>3.-LEGISLACION .....</b>	<b>32</b>
<b>4.-EVALUACION Y MEDIDA DE EMISIONES .....</b>	<b>32</b>
4.1.-CONCEPTOS BASICOS .....	32
4.2.-GENERALIDADES SOBRE TECNICAS DE MEDIDA .....	32

<b>4.3.-CLASIFICACION DE LAS TECNICAS DE MEDIDA .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4.-MUESTREO ISOCINETICO.....</b>	<b>32</b>
4.4.1.-PREPARACION DEL PUNTO DE MUESTREO .....	32
4.4.2.-CONCEPTO DE ISOCINETISMO .....	32
4.4.3.-SONDA ISOCINETICA Y MATERIAL AUXILIAR .....	32
4.4.4.-DETERMINACION DEL NUMERO DE PUNTOS.....	32
4.4.5.-PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE UN MUESTREO ISOCINETICO .....	32
4.4.6.-RESULTADOS DEL MUESTREO ISOCINETICO DE PARTICULAS .....	32
4.4.7.-EJEMPLO DE UN INFORME DE MUESTREO ISOCINETICO .....	32
<b>4.5.-ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION.....</b>	<b>32</b>
<b>4.6.-MUESTREADORES MANUALES DE PARTICULAS Y GASES EN INMISION .....</b>	<b>32</b>
4.6.1.-PARTICULAS SEDIMENTABLES .....	32
4.6.2.- CAPTADOR DE PEQUEÑO VOLUMEN (SF) .....	32
4.6.3.- CAPTADOR DE ALTO VOLUMEN (CAV) .....	32
4.6.4.- CAPTADOR PARA LA DETERMINACION DE PLOMO.....	32
4.6.5.- CAPTADOR DE NO <sub>x</sub> .....	32
<b>4.7.-TECNICAS ANALITICAS APLICABLES .....</b>	<b>32</b>
4.7.1.-DIOXIDO DE AZUFRE (SO <sub>2</sub> ).....	32
4.7.2.-OXIDOS DE NITRÓGENO (NO, NO <sub>2</sub> ).....	32
4.7.3.-PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN.....	32
4.7.4.-PARTÍCULAS SEDIMENTABLES .....	32
4.7.5.-PLOMO .....	32
<b>4.8.-TECNICAS INSTRUMENTALES Y ANALITICAS EN CONTINUO .....</b>	<b>32</b>
4.8.1.-DIÓXIDO DE AZUFRE (SO <sub>2</sub> ).....	32
4.8.2.-OXIDOS DE NITRÓGENO (NO - NO <sub>2</sub> ) .....	32
4.8.3.-OTROS CONTAMINANTES GASEOSOS.....	32
4.8.4.-PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN.....	32
<b>4.9.-OFERTA COMERCIAL DE EQUIPOS DE MEDIDA .....</b>	<b>32</b>
<b>5.-CALCULO DE LA ALTURA DE CHIMENEAS .....</b>	<b>32</b>
5.1.-MODELO GENERAL DE DIFUSION DE CONTAMINANTES.....	32
5.2.-CALCULO SIMPLIFICADO PARA PEQUEÑAS CHIMENEAS .....	32
<b>6.-TECNICAS DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA .....</b>	<b>32</b>
6.1.-MEJORAS EN LA COMBUSTION EN FOCOS FIJOS.....	32
6.1.1.-PARTICULAS .....	32
6.1.2.-ANHIDRIDO SULFUROSO .....	32
6.1.3.-MONOXIDO DE CARBONO.....	32
6.1.4.-OXIDOS DE NITROGENO .....	32
<b>7.-TECNICAS DE CORRECCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA .....</b>	<b>32</b>
7.1.-SEPARACION DE PARTICULAS.....	32
7.1.1.-SEPARADORES PREVIOS.....	32
7.1.2.-FILTROS DE MANGAS .....	32
7.1.3.-PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS .....	32



7.1.4.-COMPARACION ENTRE EQUIPOS DE DEPURACION DE PARTICULAS.....	32
<b>7.2.-DEPURACION DE GASES.....</b>	<b>32</b>
7.2.1.-ABSORCION.....	32
7.2.2.-DESULFURACION.....	32
7.2.3.-DESNITRIFICACION.....	32
7.2.4.-ADSORCION.....	32
7.2.5.-COMBUSTION.....	32
7.2.6.-SISTEMAS DE CONTROL DE COV'S.....	32
7.2.7.-SISTEMAS DESOX DENOX.....	32
<b>7.3.-COMPARACION ENTRE SISTEMAS.....</b>	<b>32</b>
<b>7.4.-OFERTA COMERCIAL DE EQUIPOS DE DEPURACION.....</b>	<b>32</b>
<b>8.-BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>32</b>
8.1.-TEXTOS.....	32





## 1.-INTRODUCCION

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. De la definición anterior se desprende que el que una sustancia sea considerada contaminante o no, dependerá de los efectos que produzcan sobre los receptores.

Todas las actividades del hombre, el metabolismo de la materia viva y los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la tierra, van acompañados de emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles que al descargarse a la atmósfera se integran en los distintos ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la Tierra.

A continuación estudiaremos como más significativos desde el punto de vista de la contaminación atmosférica los siguientes ciclos: Agua (H<sub>2</sub>O), Carbono (C), Oxígeno (O<sub>2</sub>), Hidrógeno (H), Azufre (S) y Nitrógeno (N<sub>2</sub>). Los tres primeros son de tipo gaseoso mientras que los dos últimos son del tipo sedimentario.

### 1.1.-CICLOS BIOGEOQUIMICOS

#### 1.1.1.-CICLO DEL AGUA

El agua y la vida son inseparables. En los seres vivos el agua es el componente que se encuentra en mayor proporción.

Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica el agua desempeña un importante papel ya que:

- Actúa como disolvente de un gran número de sustancias.
- Se encarga del transporte de la mayoría de los nutrientes esenciales y sustancias contaminantes.
- Favorece las reacciones atmosféricas actuando como reactivo.
- Es importante como factor de termorregulación, debido a su alto calor específico.
- Impide emisión al espacio exterior de la radiación de longitudes de onda larga (efecto invernadero), permitiendo temperaturas adecuadas para la vida en la biosfera

Se ha estimado que el volumen total del agua de la biosfera alcanza una cantidad de unos 1.360 X E15 litros. De esta inmensa magnitud, cerca del 97% del volumen total corresponde al agua del mar, aproximadamente el 2,25% de agua congelada de los glaciares y capas de hielo polares y de la fracción restante, un 0,75% aparece principalmente en forma de lagos, aguas superficiales (ríos, arroyos,...) y aguas subterráneas. Solamente un 0,001% del agua se encuentra en la atmósfera en forma de vapor.

Por su distribución y sus características físicoquímicas, el agua se mueve constantemente desde la atmósfera a la tierra y a los mares evaporándose luego a la atmósfera, constituyendo el ciclo hidrológico que es uno de los grandes ciclos de la biosfera.

En su continua circulación, el agua suministra la conexión entre la atmósfera, la litosfera e hidrosfera, haciendo posible la presencia de la vida sobre la tierra.

El ciclo del agua está controlado por la energía solar y por la fuerza de la gravedad.

El agua circula desde la superficie terrestre a la atmósfera de dos formas:

- Por evaporación.
- Por transpiración.

Se ha observado que la precipitación caída sobre el mar es más del triple de la que cae sobre los continentes.

El destino que puede experimentar el agua de lluvias es diverso:

- Puede ocurrir que debido a la acción de la energía solar, se evapore de forma inmediata.
- Puede ir a parar al mar, que constituye su depósito principal en la biosfera. -O bien puede caer en las masas terrestres.

La figura adjunta muestra de forma esquemática las distintas fases del ciclo del agua.

### 1.1.2.-CICLO DEL CARBONO

El carbono se halla en la Naturaleza principalmente en forma de carbonatos, rocas calcáreas y sobre todo en forma de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).

El ciclo del carbono es de tipo gaseoso, siendo un elemento muy abundante en la atmósfera en la que se acumulan unas 700 x E<sup>9</sup> Tm, del mismo. No obstante existe todavía un mayor depósito de este elemento en la hidrosfera en la que se encuentran 50.000 x E<sup>9</sup> Tm de carbono disuelto en el agua, que tiende a regular la cantidad de carbono en la atmósfera.

Recientes estudios científicos han señalado al océano Índico como principal sumidero de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera.

La actividad respiratoria de los seres vivos es responsable de la devolución a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> de una cantidad considerable de carbono fijado biológicamente. La devolución de la mayor cantidad de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se debe a la actividad respiratoria de los organismos descomponedores al transformar los desechos y restos de otros niveles tróficos. En los últimos años se ha visto incrementada de modo alarmante la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera como consecuencia de incremento de la combustión de los combustibles fósiles.

A partir del anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera y del disuelto en el agua, los organismos autótrofos sintetizan la materia orgánica.

Las plantas verdes a través de la fotosíntesis captan el CO<sub>2</sub> del agua o del aire y lo transforman en compuestos orgánicos, que servirán para el crecimiento de las propias plantas, y como alimento a los consumidores y a los descomponedores. La respiración, la fermentación y la combustión, como ya se ha dicho, devuelven el gas carbónico a la atmósfera cerrando el ciclo.

Una característica importante del ciclo de carbono es que las vías de utilización del elemento son muy numerosas, pero mucho más aún lo son las vías de devolución del carbono a la atmósfera. El conjunto



de todas estas vías dan lugar a un sistema equilibrado y autorregulado por lo que cualquier exceso o déficit puede superarse y compensarse en un periodo más o menos largo.

Desde la revolución industrial, el uso de los combustibles fósiles ha provocado la emisión a la atmósfera de grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, cuyos efectos a largo plazo no se conocen con exactitud. Posteriormente se examinarán las teorías a este respecto al estudiar el efecto invernadero.

### 1.1.3.-CICLO DEL OXIGENO

El oxígeno es uno de los principales constituyentes del aire.

El ciclo del oxígeno es más complicado que el del carbono debido a que su alta reactividad química le hace aparecer en la naturaleza bajo múltiples formas.

El oxígeno contenido en la atmósfera y en las rocas superficiales es de origen biológico, es decir, ha sido producido por los organismos autótrofos, ya que inicialmente la atmósfera carecía de este elemento.

El oxígeno molecular se puede formar también por disociación de las moléculas de agua en las capas altas de la atmósfera, bajo los efectos de la radiación solar ultravioleta, pero el oxígeno atmosférico es únicamente de origen biológico.

El ciclo del oxígeno se realiza en su mayor parte entre la atmósfera y los seres vivos. Su producción se realiza por la fotosíntesis y su consumo por la respiración de plantas y animales y en el desarrollo de los procesos industriales de combustión.

Este ciclo aparece como la imagen inversa del ciclo del carbono, ya que sus movimientos son en sentido opuesto.

### 1.1.4.- CICLO DEL AZUFRE

Los mayores depósitos de azufre son de tipo sedimentario encontrándose en el agua y el suelo principalmente. Se trata por tanto de un ciclo sedimentario. No obstante una parte pequeña del azufre se encuentra en la atmósfera en fase gaseosa formando anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>), y sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>).

La principal fuente de azufre para los organismos es el sulfato inorgánico disuelto en el agua que es absorbido por las plantas y utilizado en la formación de aminoácidos azufrados. Parte de este azufre pasa a la atmósfera en forma de sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>) por el ataque producido por las bacterias heterótrofas a los desechos orgánicos.

Las zonas profundas de los ecosistemas acuáticos presentan una gran cantidad de sulfuro de hidrógeno. Ciertas bacterias sulfurosas, oxidan el sulfuro de hidrógeno a azufre elemental. Por otra parte existe otro tipo de bacterias capaces de reoxidar el sulfuro de hidrógeno en sulfatos, que pueden ser usados de nuevo por los organismos.



La fase sedimentaria del ciclo corresponde a la precipitación de azufre bajo condiciones anaerobios en presencia de hierro partiendo de sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ) lo que produce una acumulación lenta y continua de azufre en los sedimentos profundos.

Cuando esta acumulación de azufre se produce en yacimientos carboníferos y petrolíferos, da como consecuencia la presencia de este elemento en los combustibles fósiles.

La extracción de combustibles fósiles y su utilización en procesos de combustión produce la liberación del azufre contenido en los mismos a la atmósfera en forma de anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ). Una parte del  $\text{SO}_2$  presente en la atmósfera es reabsorbido por las plantas y otra se transforma en sulfatos ( $\text{SO}_4^{=}$ ) que vuelven a la tierra por deposición o precipitación donde son absorbidos por el suelo y desde donde pueden volver a ser utilizados por los organismos con lo que queda cerrado el ciclo.

### 1.1.5.- CICLO DEL NITROGENO

Es un ciclo típicamente gaseoso, siendo su principal depósito la atmósfera, que contiene un 79 % de nitrógeno en forma de gas.

Los cuatro procesos esenciales que intervienen en el ciclo del nitrógeno son los siguientes:

- Fijación del nitrógeno, por bacterias específicas, que transforman el nitrógeno atmosférico en nitratos por procesos físico- químicos.
- Amonificación, realizada por bacterias y hongos que convierten los nitratos en amoniaco y compuestos de amonio.
- Nitrificación, realizado por bacterias nitrificantes, que convierten los compuestos de amonio y el amoniaco en nitratos.
- Desnitrificación, realizado por bacterias desnitrificantes, que transforman el nitrato en nitrógeno atmosférico.

## **1.2.-ALTERACIONES DE LOS CICLOS BIOGEOQUIMICOS POR LAS ACTIVIDADES HUMANAS**

Durante millones de años los ciclos biogeoquímicos se han repetido sin cesar dando lugar a un determinado equilibrio ecológico, que ha condicionado las distintas formas de vida que actualmente se conocen sobre la Tierra.

A partir de la revolución industrial, no hace más de cien años, las actividades humanas relacionadas con el uso de los recursos naturales se han basado en un enfoque totalmente economicista, no teniendo en cuenta para nada los condicionantes ambientales, lo que ha dado lugar a importantes alteraciones del entorno físico y biológico que ponen en peligro el mantenimiento del equilibrio y la producción sostenida de los ecosistemas naturales.

Un ejemplo del uso irracional de los recursos naturales es el empleo que se ha hecho de la atmósfera, recurso natural consistente en las masas aéreas con sus propiedades físico químicas y desplazamientos característicos que durante décadas se viene utilizando como un inmenso vertedero donde se echan cada vez mayores cantidades de sustancias contaminantes. Los efectos negativos causados por esta actitud han empezado a aparecer en forma de riesgos para la salud, para los ecosistemas naturales e incluso para los materiales.





Al estudiar la contaminación atmosférica hay que considerar el deterioro o las alteraciones que produce a dos escalas: la primera es global, es decir, a escala macroecológica o planetaria y la segunda es de acción local o microecológica. Tanto las alteraciones a escala microecológica como macroecológica obedecen a las mismas causas, puesto que las alteraciones macroecológicas son función y consecuencia de las microecológicas.

Las causas de las alteraciones atmosféricas pueden tener su origen en las diversas actividades atmosféricas que el hombre desarrolla en la tierra (causas antropogénicas) y también ser debidas a fenómenos naturales (causas telúricas).

A pesar del rápido crecimiento del volumen de conocimientos referente a muchas de las impurezas de la atmósfera, se desconoce el total de sustancias contaminantes presentes en ella, su forma de actuar y sus efectos completos sobre los ecosistemas y sobre el hombre.

Todas las actividades del hombre, el metabolismo de la materia viva y los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la tierra van acompañados de emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles que quedan suspendidos en la atmósfera y pasan a formar parte del aire que respiramos.

#### - EL AIRE

La capa inferior de la atmósfera, el aire, está formada por dos grupos de componentes, unos que se presentan en proporciones constantes y otros que aparecen en proporciones variables.

La densidad del aire, en condiciones normales, es de 1,293 gramos por litro y su peso molecular medio es de 28,95. Los componentes constantes son el nitrógeno, el oxígeno y los gases nobles. Los componentes que aparecen en proporciones variables son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el vapor de agua así como los diversos contaminantes.

El contenido de agua en la atmósfera oscila entre el 0,01 y el 5 por ciento.  
tormentas.

Los componentes que se presentan en menor cuantía en el aire natural son numerosos y varios de ellos provienen de diversos fenómenos naturales. Así el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), fluoruro de hidrógeno (HF), el cloruro de hidrógeno (HCl) y el monóxido de carbono (CO) emanan a la atmósfera en las erupciones volcánicas. El sulfuro de hidrógeno (HS) procede de las acumulaciones de gas natural y de los volcanes. La putrefacción de plantas y animales bajo condiciones donde no hay oxígeno (descomposición anaerobio) produce emanaciones de metano (CH<sub>4</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y sulfuro de hidrógeno. Los óxidos de nitrógeno (N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>) son producidos por descargas eléctricas durante las tormentas, mientras que toneladas de monóxido de carbono son generados en los incendios forestales.

El ozono del aire proviene fundamentalmente de procesos fotoquímicos y de las descargas eléctricas de las tormentas.

Los principales componentes del aire son el nitrógeno y el oxígeno. El nitrógeno en condiciones ordinarias es inactivo, actúa diluyendo el oxígeno del aire, moderando la intensidad de su acción. El nitrógeno es un elemento esencial para la vida de las plantas, pero muy pocas son las que pueden asimilarlo en estado libre. Es también un elemento esencial en los seres vivos ya que forma parte de la estructura de la molécula de los ácidos nucleicos (ADN).

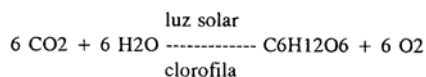


El oxígeno es el componente activo de la atmósfera. Es aspirado por los animales y por los hombres y la corriente sanguínea lo lleva de los pulmones a los tejidos donde, sirve para oxidar los hidratos de carbono y producir la energía que requiere el organismo para poder efectuar sus movimientos.

De la atmósfera se extraen grandes cantidades de oxígeno para la descomposición de la materia orgánica, desprendiéndose CO<sub>2</sub> como resultado de estos procesos; si no se repusiera en la misma proporción en que se extrae, el oxígeno en la atmósfera iría disminuyendo.

El aporte del oxígeno eliminado en los procesos anteriores lo realizan las plantas verdes a través del proceso de la fotosíntesis, mediante el cual se absorbe el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en la atmósfera bajo la acción de la luz solar y se sintetizan hidratos de carbono que quedan acumulados en las fibras vegetales, desprendiendo oxígeno por las hojas.

El proceso puede expresarse del siguiente modo:



De aquí que la proporción de oxígeno en el aire se mantenga prácticamente constante. Vemos que este es el proceso contrario a la respiración y combustión.

En la respiración y combustión se absorbe oxígeno desprendiendo CO<sub>2</sub>; en la fotosíntesis ocurre lo contrario. Este ciclo, que está equilibrado en la naturaleza, se puede alterar como consecuencia de las perturbaciones producidas por la actividad humana en uno u otro sentido.

### **1.3.- PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFERICOS Y EFECTOS QUE PRODUCEN.**

Los contaminantes atmosféricos primarios provienen de muy diversas fuentes, por lo que su naturaleza física y su composición química es muy variada, si bien podemos agruparlos atendiendo a su peculiaridad más característica, su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos).

Los contaminantes más frecuentemente emitidos a la atmósfera, que son causa de alteraciones ambientales son :

- Aerosoles, en los que se incluye el polvo con partículas sedimentables y en suspensión y los humas.
- Oxidos de azufre, SO<sub>x</sub> (SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, fundamentalmente).
- Monóxido de carbono, CO.
- Oxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub> (NO y NO<sub>2</sub>, fundamentalmente).
- Hidrocarburos, Hn Cm.
- Ozono, O<sub>3</sub>.

Además de estas sustancias hay una serie de contaminantes que se presentan más raramente pero que pueden afectar determinadas zonas por ser muy perjudiciales. Estos son:

- Otros derivados del azufre y del nitrógeno.
- Halógenos y sus derivados.
- Arsénico y sus derivados.
- Componentes orgánicos.



- Partículas de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc.
- Partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos.

Otro tipo de contaminantes presentes en la atmósfera son los denominados secundarios, tienen la característica de que no se emiten directamente a la atmósfera. Son sustancias producidas a través de reacciones atmosféricas que tienen lugar entre contaminantes primarios y favorecidos por una serie de factores ambientales, como es el caso de la reacción entre los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno (precursores) en presencia de una fuerte radiación solar (reacciones fotoquímicas), en las que se forman una serie de sustancias complejas tales como el ozono, aldehídos, peróxido de hidrógeno, peroxiacetilnitrilo (PAN), radicales libres, partículas sólidas, etc, denominados oxidantes y que dan lugar a la contaminación fotoquímica.

Otra clase de contaminantes secundarios son los sulfatos y los nitratos formados a partir de las emisiones de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), aunque en ocasiones pueden aparecer como contaminantes primarios.

Existen además otros efectos contaminantes tales como las radiaciones ionizantes procedentes de los elementos radioactivos presentes en la atmósfera, que dan lugar a la contaminación radioactiva, así como los ruidos que producen la contaminación sonora.

### 1.3.1.-AEROSOLES

El término aerosol o partícula se utiliza a veces indistintamente ya que los aerosoles atmosféricos se definen como dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire.

Las propiedades de los aerosoles que más afectan a los procesos de contaminación son el tamaño de sus partículas, la forma y su composición química.

El tamaño de las partículas oscila entre  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$  y  $10^{+3}$   $\mu\text{m}$ , aunque existen algunas muy especiales fuera de estos límites.

En la atmósfera las partículas de tamaño inferior a 0,1  $\mu\text{m}$  tienen un comportamiento similar al de las moléculas. En su movimiento al azar se producen choques entre ellas formando agregados de mayor tamaño en un proceso denominado de coagulación.

Las partículas mayores de 1  $\mu\text{m}$  tienen un comportamiento muy diferente al sufrir una significativa deposición gravitacional, siendo por otra parte baja su tasa de coagulación.

Las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$  tienden a formar suspensiones mecánicamente estables en el aire que reciben el nombre de matena en suspensión, permaneciendo en la atmósfera durante prolongados períodos de tiempo, pudiendo ser trasladados a grandes distancias por la acción del viento.

Las partículas mayores de 10  $\mu\text{m}$  permanecen en suspensión en el aire durante períodos de tiempo relativamente cortos como consecuencia de elevadas tasas de deposición gravitacional, por lo que se las conoce como "materia sedimentable". Sus efectos se acusan en las proximidades de las fuentes emisoras.

El tamaño de las partículas es un factor muy importante en la determinación de los efectos que producen y de los lugares que afectan, ya que de él depende tanto el tiempo de permanencia en la atmósfera, como la facilidad de introducirse en las vías respiratorias.

La forma de las partículas líquidas es esférica en la inmensa mayoría de los casos, adoptando las sólidas formas muy variables como rectangular (cuarzo y polvos minerales), astillada (polvo de cemento), laminar (mica, bronce) y esférica (negro de humo, polen).

Denominación	Composición
Núcleos de Aitken .....	Partículas submicrónicas (menos de $10^{-1}$ $\mu\text{m}$ de diámetro).
Partículas medias (en suspensión) .....	Partículas con un diámetro comprendido entre $10^{-1}$ y $10$ $\mu\text{m}$ .
Partículas sedimentables .....	Partículas con diámetro superior a $10$ $\mu\text{m}$ .
Polvos .....	Partículas sólidas de origen mineral o materia sólida dispersada por el aire.
Humos industriales .....	Partículas sólidas o líquidas debidas a la volatilización de metales, seguida o no de su oxidación por el aire o condensación de vapores.
Humos de combustión .....	Humos debidos a procesos de combustión, constituidos por partículas de carbono y de hidrocarburos no quemados y cenizas volantes.

La composición química de las partículas varia mucho, dependiendo fundamentalmente de su origen. Así, las partículas de polvo procedentes del suelo contienen primariamente compuestos de calcio, aluminio y silicio. El humo procedente de la combustión del carbón, petróleo, madera y residuos domésticos, contienen muchos compuestos orgánicos, hallándose estos también presentes en los polvos de insecticidas, así como en algunos productos procedentes de la fabricación de alimentos y de la industria química.

En la combustión del carbón se liberan los elementos traza contenidos en el mismo, entrando a formar parte de las partículas liberadas a la atmósfera, generalmente en forma de óxidos.

Recientemente se está prestando mucha atención a la presencia de metales traza en las partículas procedentes de combustiones, ya que muchos de ellos son tóxicos y podrían producir serios riesgos para la salud si aumentaran sus concentraciones en la atmósfera.

Los efectos que producen las partículas sobre el ambiente los podemos clasificar en efectos sobre:

- El hombre.
- Las plantas.
- Los materiales.
- La visibilidad.
- La radiación solar total.

Las partículas penetran en el cuerpo humano, casi exclusivamente a través del sistema respiratorio, dependiendo el efecto sobre el mismo del grado de penetración de las partículas en el sistema respiratorio, que es función tanto de la granulometría como de la toxicidad o composición química de las mismas.

Las partículas más perjudiciales son las de menor tamaño ( $< 0,5$   $\mu\text{m}$ ), ya que pueden llegar a los alveolos pulmonares, permaneciendo en ellos durante largo tiempo sin eliminarse.

El efecto tóxico producido por las partículas que permanecen en los pulmones, se puede manifestar de tres formas distintas:

-Partículas inertes por sí mismas que pueden interferir la eliminación de otras más tóxicas. -Partículas que pueden transportar adsorbidas o absorbidas, moléculas de gases irritantes. -Partículas que son intrínsecamente tóxicas.

Las investigaciones referentes a los efectos de las partículas sobre las plantas, son relativamente escasas; no obstante, de estudios específicos se ha comprobado que el polvo forma una capa sobre las hojas interfiriendo la fotosíntesis de la planta, impidiendo parcialmente la penetración de la luz solar necesaria, lo que inhibe el crecimiento de las plantas.

Un posible efecto indirecto de las partículas depositadas en las plantas es que contengan elementos nocivos para los animales que las ingieren.

Las partículas transportadas por el viento pueden causar una amplia gama de daños sobre los materiales.

Los daños se producen como consecuencia de la deposición de las partículas sobre los materiales, lo que obliga a frecuentes limpiezas que debilitan los materiales, también producen y aceleran los procesos de corrosión de los metales, especialmente en presencia de compuestos que contengan azufre.

La disminución de la visibilidad es otro de los efectos producidos por las partículas, creando problemas evidentes, algunos de ellos peligrosos y otros simplemente enojosos. La visibilidad se ve reducida a causa de la dispersión de la luz producida por las partículas, siendo las partículas de tamaño comprendido entre 0,1 y 1  $\mu\text{m}$  de diámetro las que actúan más eficazmente en la dispersión, pues su diámetro se aproxima a la longitud de onda del espectro visible (de 0,4 a 0,8  $\mu\text{m}$ ).

Además de crear problemas de visibilidad, la contaminación por partículas también disminuye la cantidad total de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, al absorber parte de la radiación incidente y dispersar otra parte hacia el espacio.

Se ha observado que la formación de niebla es más frecuente en las ciudades que en el campo, a pesar de que en las ciudades la temperatura del aire es más elevada y la humedad relativa más baja que en el campo. Este fenómeno, se explica porque en presencia de altas concentraciones de  $\text{SO}_2$ , la formación de ácido sulfúrico por oxidación del  $\text{SO}_2$  en la superficie de las partículas de un ambiente húmedo, provoca la formación de pequeñas gotas de niebla, que de otro modo no se hubieran producido.

Se estima que en las zonas urbanas, como consecuencia de su mayor contaminación por partículas en la atmósfera, reciben entre un 15 y 20 por ciento menos de radiación solar total que en las zonas rurales, pudiendo llegar esta reducción durante episodios de intensa contaminación al 30 por ciento. Dos efectos potenciales se producen: por una parte un oscurecimiento con pérdida de visibilidad y por otra una disminución de la temperatura sobre la superficie de la tierra.

### 1.3.2.-OXIDOS DE AZUFRE ( $\text{SO}_x$ )



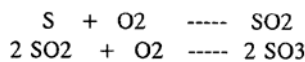
El óxido de azufre que se emite a la atmósfera en mayores cantidades es el anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) y en menor proporción, que no rebasa el 1 ó el 2 por ciento del anterior, el anhídrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>).

El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro, de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm. Es 2,2 veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplaza rápidamente en la atmósfera. Es un gas bastante estable.

El anhídrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) es un gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente. En condiciones normales no se encuentra SO<sub>3</sub> en la atmósfera en cantidades significativas, debido a que reacciona rápidamente en presencia de humedad, formando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre produce emisiones de SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, la cantidad de SO<sub>3</sub> producida depende de las condiciones de la reacción, especialmente de la temperatura y oscila entre 1 y el 10 por ciento de los SO<sub>x</sub> producidos.

Un mecanismo de formación de SO<sub>x</sub> podría ser:



La reacción segunda se produce en pequeña escala y tiene lugar muy lentamente a la temperatura de la atmósfera. El efecto neto es que la emisión de los SO<sub>x</sub> se realiza fundamentalmente en forma de SO<sub>2</sub>.

Los efectos que produce en el medio ambiente la presencia de óxidos de azufre en la atmósfera, los podemos clasificar en:

- Efectos sobre el hombre y la fauna.
- Efectos sobre las plantas.
- Efectos sobre los materiales.

La mayor parte de los efectos del SO<sub>2</sub> sobre la salud del hombre están relacionados con la irritación del sistema respiratorio. Concentraciones de 25 ppm de SO<sub>2</sub> causa tos inmediatamente y una fuerte irritación de los ojos, por debajo de esta concentración los efectos irritantes del SO<sub>2</sub> se limitan a la parte alta del tracto respiratorio y a los ojos. Experimentos llevados a cabo revelan que a elevadas concentraciones de SO<sub>2</sub>, el 95 por ciento inhalado se absorbe en la cavidad nasal.

A través de investigaciones, se han determinado los efectos a largo plazo que resultan de una prolongada exposición a bajos niveles de SO<sub>2</sub>, existiendo una correlación clara entre la incidencia de infecciones respiratorias entre los niños y el nivel de contaminación por SO<sub>2</sub> de su ambiente, aumentando la frecuencia de las infecciones con el tiempo de residencia de un niño en una zona contaminada, no conociéndose todavía la persistencia de estos efectos.

La mayor parte de la preocupación por la amenaza que para la salud representa la presencia de SO<sub>2</sub> en la atmósfera está relacionada con sus efectos sobre las personas con problemas respiratorios crónicos y con los ancianos.

Los aerosoles sulfatados son agentes irritantes de tres a cuatro veces más potentes que el SO<sub>2</sub>. El mecanismo de formación de los aerosoles sulfatados se expone en el apartado "lluvias ácidas".

Los daños que origina a la planta se manifiestan en forma de lesiones foliares extendidas entre las nervaciones, debidas a las alteraciones neuróticas provocadas por la acumulación de sulfitos y sulfatos en el parénquima foliar.



Las exposiciones a corto plazo y elevadas concentraciones de  $SO_2$ , se caracterizan por áreas muertas de las hojas que se secan y usualmente adquieren un tono blanquecino amarillento. La exposición a menores concentraciones durante períodos más prolongados ocasiona lesiones crónicas, caracterizadas por un amarilleamiento gradual de las hojas que se va extendiendo desde la zona apical a la base de las mismas.

La susceptibilidad de las plantas a los daños debidos al  $SO_2$  varia ampliamente de una especie a otra. En general y por orden de sensibilidad decreciente podemos citar los hongos, líquenes, las coníferas, las plantas herbáceas y los árboles de hoja caduca. Entre las plantas cultivadas las especies forrajeras son más sensibles que los cereales.

Las especies forestales, sobre todo las resinosas, son más afectadas que las plantas anuales, debido a que su mayor longevidad permite que aparezcan los efectos acumulativos. Los hongos y los líquenes tienen una extraordinaria sensibilidad al  $SO_2$ .

### 1.3.3.-MONOXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es el contaminante del aire más abundante en la capa inferior de la atmósfera, sobre todo en el entorno de las grandes ciudades.

El CO es un gas incoloro, inodoro e insípido, siendo un gas muy ligero no apreciablemente soluble en agua. Es inflamable y se caracteriza por su gran capacidad de dispersión.

La formación del CO es generalmente el resultado de alguno de los siguientes procesos químicos:

- Combustión incompleta del carbono.
- Reacción a elevada temperatura entre el  $CO_2$  y materiales que tienen carbono.
- Disociación del  $CO_2$  a altas temperaturas.
- Oxidación atmosférica del metano ( $CH_4$ ) procedente de la fermentación anaerobia (sin aire) de la materia orgánica.
- Proceso de producción y degradación de la clorofila en las plantas.

Los efectos que la presencia de CO en la atmósfera produce sobre el medio los podemos clasificar en:

- Efectos sobre el hombre.
- Efectos sobre las plantas.

El CO es un gas tóxico, la exposición del hombre a elevadas concentraciones de CO puede conducirle a la muerte, pero los efectos de la exposición a niveles reducidos sólo ahora empiezan a conocerse.

Los daños sobre la salud que produce el CO se debe a que al combinarse con la hemoglobina de la sangre disminuye en ésta su capacidad para ejercer su función normal de transporte de oxígeno. La afinidad del CO por la hemoglobina es más de 200 veces superior que la del oxígeno.

Los efectos producidos sobre la salud dependen de las concentraciones de CO en el aire. En orden creciente de concentraciones se aprecian efectos sobre el sistema nervioso, agudeza visual, cambios funcionales cardiacos y pulmonares, dolor de cabeza, fatiga, fallos respiratorios y muerte.

No se han detectado efectos significativos del CO en las plantas superiores sometidas a las concentraciones que actualmente se registran en las zonas contaminadas. A concentraciones muy



elevadas se inhibe la capacidad de fijación del nitrógeno de las bacterias libres después de un cierto período de exposición, pero estas circunstancias no se dan por lo general, por lo que parece improbable se produzca un impacto significativo sobre la vegetación y los microorganismos asociados.

### 1.3.4.-OXIDOS DE NITROGENO (NO<sub>x</sub>)

Los contaminantes que poseen en su molécula algún átomo de nitrógeno pueden clasificarse en tres grupos diferentes: formas orgánicas, formas oxidadas y formas reducidas.

Se conocen ocho óxidos de nitrógeno distintos, pero normalmente solo tienen interés como contaminantes dos de ellos, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El resto se encuentra en equilibrio con estos dos, pero en concentraciones tan extraordinariamente bajas que carecen de importancia.

El óxido nítrico (NO) es un gas incoloro y no inflamable, pero inodoro y tóxico. El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un gas pardo-rojizo, no es inflamable pero sí tóxico y se caracteriza por un olor muy asfijante.

Se utiliza normalmente la notación NO<sub>x</sub> para representar al NO y NO<sub>2</sub> implicados en la contaminación del aire. Una característica de estos dos compuestos es que participan en la formación de los contaminantes secundarios que producen la contaminación fotoquímica.

La mayor parte de los óxidos de nitrógeno se forman por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas.

La energía necesaria para la formación del NO es muy alta por lo que el tiempo de residencia de los gases en la zona de combustión, así como la temperatura de la llama, determinan la cantidad del mismo que se forma.

La reacción del NO con el oxígeno para dar NO<sub>2</sub> no se produce en la zona de combustión, debido a la inestabilidad de este a elevadas temperaturas. Sólo cuando la temperatura desciende por debajo de los 600°C se empieza a formar NO<sub>2</sub>, aunque en cantidades muy reducidas, pues la velocidad de reacción es muy baja. Así pues, la mayor parte de los NO<sub>x</sub> emitidos a la atmósfera lo son en la forma NO, siendo el NO<sub>2</sub> fundamentalmente un contaminante de tipo secundario.

#### CICLO FOTOLITICO DEL NO<sub>2</sub>

Los NO<sub>x</sub> vertidos a la atmósfera sufren una serie de reacciones fotoquímicas transformando el NO en NO<sub>2</sub>. Dichas reacciones se conocen con el nombre de ciclo fotolítico del NO<sub>2</sub> y se producen por la interacción entre la luz solar y el NO<sub>2</sub>, según se muestra en la figura.

El efecto neto de este ciclo, tal y como se ha descrito, no modifica las concentraciones de NO<sub>2</sub> y NO pues tanto como se destruye, se forma. Esto no ocurre en la realidad, en donde participan agentes que desequilibran el ciclo a favor de la formación de NO<sub>2</sub>.

Los efectos que los NO<sub>x</sub> presentes en la atmósfera causan en el medio ambiente los podemos clasificar en:

- Efectos sobre el hombre y la fauna.
- Efectos sobre las plantas.





-Efectos sobre los materiales.

Los NOx son potencialmente peligrosos para la salud. El NO<sub>2</sub> es unas cuatro veces más tóxico que el NO.

Unicamente a dosis elevadas, mucho mayores de las correspondientes a las concentraciones que se hallan comúnmente en la atmósfera, los NOx producen alteraciones en el tracto respiratorio.

El aumento de la dosis produce los siguientes efectos: percepción olfativa, irritación nasal, incomodidades, dolores respiratorios agudos, edema pulmonar y finalmente, la muerte.

Los NOx causan igualmente lesiones en las plantas, aunque no es fácil de distinguir cuales de estos efectos se derivan directamente de los NOx y cuales de los contaminantes secundarios producidos en el ciclo fotolítico del NO<sub>2</sub>. Se han observado daños a las plantas debidos a elevados niveles de NO<sub>2</sub> en zonas industriales productoras de ácido nítrico. Los daños aparecen en forma de manchas y necrosis en las hojas y disminución en la tasa de fotosíntesis. Los efectos de la exposición a bajos niveles de NO<sub>2</sub> durante extensos períodos de tiempo son menos evidentes.

Los efectos sobre los materiales de los NOx se manifiestan fundamentalmente sobre las aleaciones de cuproníquel, en las que producen corrosiones y sobre los tintes textiles, que pierden color al ser expuestos a los NOx.

### 1.3.5.-HIDROCARBUROS (HC)

Son sustancias que contienen hidrógeno y carbono. El estado físico de los hidrocarburos, de los que se conocen decenas de millares, depende de la su estructura molecular y en particular del número de átomos de carbono que forman su molécula.

Son gases a la temperatura ordinaria los que contienen de uno a cuatro átomos de carbono, siendo estos los más importantes desde el punto de vista de la contaminación atmosférica.

El número de hidrocarburos implicados en la contaminación del aire es muy grande. En atmósferas urbanas pueden encontrarse más de 100 hidrocarburos diferentes, de los cuales los más reactivos son las olefinas.

No hay pruebas que indiquen efectos nocivos directos de los hidrocarburos sobre el hombre a las concentraciones en que actualmente se presentan en el aire. A concentraciones muy elevadas los vapores de hidrocarburos, sobre todo de los aromáticos, pueden causar lesiones en las mucosas al ser inhaladas (recientemente se han probado los efectos cancerígenos del benceno).

El etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) es el único hidrocarburo que se sabe produce daños a la vegetación a concentraciones ambientales relativamente bajas. Los principales efectos son la inhibición del crecimiento, cambios de color en las hojas y muerte de las partes florales.

### 1.3.6.-OZONO (O<sub>3</sub>)



El ozono es una forma alotrópica del oxígeno. Su fórmula química es  $O_3$ . En condiciones normales es un gas incoloro de olor picante característico. Posee un gran poder oxidante y gran tendencia a transformarse en oxígeno.

Las concentraciones de ozono a nivel del suelo son muy pequeñas, incrementándose rápidamente con la altura.

Diversas causas, tales como las descargas eléctricas, las radiaciones X y ultravioletas y los arcos voltaicos, producen ozono, pero su presencia en la parte baja de la atmósfera se debe sobre todo a la acción fotoquímica de las radiaciones solares, en presencia de  $NO_x$  y HC. Es pues, un contaminante netamente secundario.

Los efectos producidos por el ozono sobre los seres humanos dependen de las concentraciones del mismo a que se hallas sometidos. El primer efecto detectado es la irritación de la nariz y garganta. Si se aumentan las concentraciones producen fatiga extrema, falta de coordinación, y edema pulmonar. Los experimentos actuales aún no han demostrado que la exposición al ozono a largo plazo a los niveles atmosféricos normales causan enfermedades respiratorias crónicas en el hombre.

El ozono produce lesiones en las plantas, los efectos visibles de estas lesiones son manchas blancas y punteados en las hojas, produciendo una reducción en el rendimiento de crecimiento, del desarrollo floral y en la maduración del polen.

Es de destacar el hecho de que las concentraciones de ozono que producen daños a las plantas se están alcanzando ya en algunas ciudades.

Con respecto a los efectos sobre los materiales, se sabe que muchos polimeros orgánicos, incluyendo el cancho y las fibras textiles, son alterados en presencia de pequeñas cantidades de ozono. Las concentraciones en el aire ambiente suelen ser lo bastante elevadas como para que estas acciones tengan lugar.

### 1.3.7.-COMPUESTOS HALOGENADOS

De entre los productos químicos que contienen halógenos en su molécula, son contaminantes de la atmósfera: el cloro, el fluoruro de hidrógeno, el cloruro de hidrogeno y ciertos haluros.

Merece destacarse la acción tóxica del flúor y sus derivados sobre las plantas. La sensibilidad depende de las especies y de las condiciones del medio.

En el medio forestal, las resinosas son las especies más sensibles al flúor ya que al ser la mayoría de ellos de hoja perenne, el efecto acumulativo del fluor sobrepasa los umbrales de toxicidad, apareciendo necrosis que llegan a provocar la mortandad de masas enteras.

### 1.3.8.- METALES TOXICOS

Los metales tóxicos se han identificado recientemente como una nueva clase de contaminantes, quizás más peligrosos para el medioambiente que los anteriormente definidos.

Es común el empleo del término metal pesado en el estudio de la contaminación por metales tóxicos.



Los metales son elementos químicos que generalmente se hallan presentes en la atmósfera en muy bajas concentraciones. Durante cada una de las operaciones de extracción de minerales, fundición y refinado y uso de los metales se liberan estos al medio ambiente, además del uso directo, otras actividades humanas causan contaminación ambiental por metales, por ejemplo la combustión de combustibles fósiles y gasolinas.

Una de las consecuencias más graves de la presencia de metales tóxicos en el ambiente es que no son degradados ni química ni biológicamente por la naturaleza, causa de su persistencia en ella. Esta persistencia lleva a la amplificación biológica de los metales en las cadenas tróficas.

Como consecuencia de este proceso, los niveles de metales en los miembros superiores de la cadena pueden alcanzar valores muy superiores a los que se encuentran en la atmósfera.

Los metales tóxicos representan una amenaza para la salud humana cuando se ingieren en cantidades suficientes, ya que los seres humanos presentan una tendencia a acumular metales.

Entre los metales tóxicos más importante por sus efectos sobre la salud del ser humano están el mercurio (Hg) y el plomo (Pb).

El mercurio inorgánico tiende a acumularse en los tejidos hepáticos y renales. Los efectos últimos del mercurio en el cuerpo parecen ser la inhibición de la actividad enzimática y de las actividades normales de las células. La inhalación de vapor de mercurio es muy peligrosa, pero su baja concentración en el aire limita el riesgo a los que entran en contacto directo con él de manera regular.

La cantidad de plomo en el aire ha experimentado un marcado aumento como consecuencia de las actividades humanas siendo las concentraciones de plomo en las áreas urbanas de 5 a 50 veces superiores que en las áreas rurales.

El plomo inorgánico es absorbido principalmente a través de los tractos gastrointestinal y respiratorio. Entre el 30 y 40 por ciento del plomo inhalado por los pulmones alcanza el torrente sanguíneo, almacenándose en los huesos una parte, siendo excretado con la orina el resto.

El primer síntoma de envenenamiento por plomo es la anemia. Los cálculos varían en lo que concierne al nivel exacto de plomo en sangre necesario para causar la aparición de síntomas de envenenamiento por plomo.

El envenenamiento por plomo no sólo se limita a los seres humanos, también afecta otros animales y a los vegetales. El plomo vertido a la atmósfera se deposita sobre la vegetación y penetra en el suelo donde permanece mucho tiempo, debido a su escasa solubilidad, teniendo tendencia a acumularse en los tejidos vegetales.

La acumulación lenta y progresiva de estos contaminantes en la biomasa, hace que sus efectos puedan hacerse visibles al cabo de mucho tiempo y a grandes distancias, dificultando la conclusión de una refacción causa-efecto y obligando a buscar soluciones a medio o largo plazo.

Hay otros tipos de contaminación producidos como consecuencia de las transformaciones y reacciones que los contaminantes primarios sufren en la atmósfera y que dan lugar a una serie de fenómenos talos como la contaminación fotoquímica, lluvias ácidas y alteración de la capa de ozono.

## 1.4.- ALTERACIONES MACROECOLOGICAS

Hasta aquí se han expuesto los principales efectos de los contaminantes de dimensión microecológica, es decir, los efectos aparecen directamente en la zona donde se producen las emisiones de los contaminantes.

Examinaremos ahora las alteraciones que pueden producirse en la atmósfera como consecuencia de efectos retardados o sinérgicos, más complejos y extensos que los anteriores. Es la dimensión macroecológica de la contaminación atmosférica que afecta a grandes áreas geográficas alejadas de los focos e incluso a todo el globo terrestre.

### 1.4.1.- CONTAMINACION FOTOQUIMICA

Se denomina contaminación fotoquímica la originada por aquellos contaminantes secundarios oxidantes formados al interaccionar en la atmósfera los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos, el oxígeno y la radiación ultravioleta de los rayos del sol.

Este tipo de contaminación es cada vez más frecuente en las grandes ciudades, debido a las grandes cantidades de NO<sub>x</sub> y HC que se vierten a la atmósfera.

Para que se formen oxidantes, es necesario que haya un sistema de altas presiones estacionario asociado a una fuerte insolación y vientos débiles, es decir, situaciones atmosféricas anticiclónicas que dificulten la dispersión de los contaminantes.

Aunque el proceso de formación de los oxidantes fotoquímicos no se conocen exactamente en la actualidad, si se conocen algunos aspectos generales del mismo, que podemos clasificar en tres tipos de reacciones fundamentales. Estas son:

- 1.-El ciclo fotolítico del N<sub>2</sub>O ya descrito anteriormente.
- 2.-La presencia en el aire de hidrocarburos hace que el ciclo anterior se transforme al competir estos por el O<sub>3</sub> generados, produciendo radicales hidrocarbonados libres muy activos.
- 3.-Los radicales hidrocarbonados libres producen una mezcla compleja al reaccionar con otros radicales libres, con los contaminantes primarios y con los constituyentes normales del aire.

La mezcla resultante se denomina comúnmente contaminación (Smog) fotoquímica. Las concentraciones de los contaminantes atmosféricos varía regularmente durante el día, dependiendo de dos factores fundamentales: la variación de las actividades humanas durante el día que condiciona los contaminantes primarios emitidos, y la intensidad de la radiación solar necesaria para que las reacciones tengan lugar y que varían a lo largo de los días.

El mecanismo de formación de oxidantes fotoquímicos tiene lugar en el tiempo de la siguiente forma:

A primeras horas de la mañana tiene lugar una fuerte emisión de HC y NO al comenzar la actividad humana en las grandes ciudades. Al aumentar la intensidad de la radiación solar disminuye la concentración de NO y aumenta la de N<sub>2</sub>O, apareciendo niveles de ozono significativos. Después del mediodía los niveles de ozono bajan, así como las concentraciones de aldehídos e hidrocarburos.



Los principales efectos que la contaminación fotoquímica produce sobre el hombre es la irritación de los ojos y de las mucosas, dañando especialmente a las personas con afecciones asmáticas y troncopulmonares, causadas principalmente por los nitratos de peroxiacilo.

Los seres vivos más sensibles a la acción de los oxidantes son los vegetales, tanto el ozono como los PAN causan daños a las plantas. La flora queda afectada incluso con bajas concentraciones de oxidantes. Las hojas muestran un barnizado y bronceado en el envés, así como un ataque general en las hojas jóvenes. Se han encontrado especialmente sensibles a los efectos de los oxidantes los cultivos de cítricos, forrajes y hortalizas, así como las coníferas.

Se empieza a creer que buena parte de la degradación sufrida por los materiales expuesto a la intemperie es debida a los efectos de la contaminación atmosférica y muy especialmente al ataque por parte de los oxidantes fotoquímicos.

Otro efecto de los oxidantes fotoquímicos sobre el ambiente es la reducción de la visibilidad, como consecuencia de la formación de una niebla de color parduzco, característica de la contaminación fotoquímica.

#### 1.4.2.- LLUVIAS ACIDAS

La lluvia ácida puede definirse de un modo simple como precipitación y partículas que se han acidificado por efecto de la contaminación del aire. Se consideran ácidas, precipitaciones con pH inferior a 5.6, encontrándose en amplias regiones del nordeste europeo y de América del norte precipitaciones con medias anuales de pH en torno al 4.1-4.3.

Son ya muchos los indicios disponibles, suficientes para dejar bien claro que la lluvia ácida o, con mayor precisión, los contaminantes que la provocan, suponen una interferencia a gran escala en los ciclos biogeoquímicos, a través de los cuales los seres vivos interaccionan con su medio ambiente. Una buena gestión a escala planetaria demanda que se tomen medidas para proteger la integridad de estos ciclos.

La lluvia ácida constituye una consecuencia directa de los mecanismos de autolimpieza de la propia atmósfera. Las minúsculas gotas de agua que componen las nubes capturan continuamente partículas en suspensión y gases traza solubles. Cuando se origina la lluvia por coalescencia del agua de la nube, arrastra consigo las impurezas de la atmósfera. No todos los gases traza son eliminados por la precipitación, pero el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) emitidos a la atmósfera, se convierten químicamente en ácidos, sulfúrico y nítrico; que se incorporan con facilidad a las gotitas de las nubes.

Los procesos que convierten los gases en ácidos y los arrastran fuera de la atmósfera comenzaron a operar mucho antes de que el ser humano empezara a quemar grandes cantidades de combustibles fósiles. Procesos naturales como el vulcanismo y la actividad de las bacterias del suelo, emiten así mismo, compuestos de nitrógeno y de azufre. Pero la actividad económica humana ha otorgado a estas reacciones un protagonismo inmenso. Reacciones que se activan con la luz solar y dependen de la abundante provisión atmosférica de oxígeno y agua.

El ciclo de reacciones se desarrolla en la troposfera, los 10 o 12 kilómetros inferiores de la atmósfera. Empieza cuando un fotón de luz solar choca con un molécula de ozono (O<sub>3</sub>), que puede haber descendido de la capa de ozono estratosférica o haberse formado en la propia troposfera por acción de contaminantes que contienen carbono y nitrógeno.



El resultado es una molécula de oxígeno ( $O_2$ ) y un solitario átomo, muy reactivo, de este mismo elemento, que se combina con una molécula de agua ( $H_2O$ ) para formar dos radicales hidroxilo ( $HO$ ). Esta especie química, infrecuente y activa, transforma el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) en ácido nítrico ( $HN0_3$ ) e inicia las reacciones que transforman el dióxido de azufre en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

Los ácidos sulfúrico y nítrico formados a partir de contaminantes gaseosos pueden abrirse paso fácilmente en las nubes. También se forma algo de ácido sulfúrico directamente en las gotitas de la nube, a partir de dióxido de azufre y peróxido de hidrógeno. El ácido nítrico se disuelve en seguida en las gotitas de la nube. El ácido sulfúrico originado mediante reacciones en fase gaseosa se condensa para formar gotas microscópicas, de aproximadamente 0,1 a 2  $\mu m$ , que son un componente de la neblina estival del oriente estadounidense. Una fracción de estas partículas de sulfato se deposita en el suelo, en un proceso conocido como deposición seca (la deposición seca designa también la captura de dióxido de azufre, gaseoso, por la vegetación). No obstante, la mayor parte se incorpora en las nubes. La humedad se condensa con facilidad en cualquier superficie existente (núcleo de condensación); las partículas de sulfato son núcleos de condensación idóneos, convirtiéndose en gotitas nubosas que contienen ácido sulfúrico diluido.

Los ácidos sulfúrico y nítrico de las antedichas gotitas les confieren un pH muy bajo. En el este de Estados Unidos, el agua recogida cerca de la base de las nubes, durante el verano, ofrece un pH en torno a 3,6, pero se han registrado valores inferiores, de 2,6. En el área de Los Angeles, el pH de la niebla ha alcanzado valores de 2, la acidez del zumo de limón, aproximadamente.

El suelo y la vegetación envueltos en nubes acidificadas, como pueden estarlo los bosques de elevada altitud, quedan en contacto directo con la base de las nubes, extraordinariamente ácida.

La lluvia ácida puede caer a centenares de kilómetros del foco de contaminación. Allí donde se deposita experimenta un nuevo episodio de alteraciones físicas y químicas, que pueden rebajar la acidez y modificar las características químicas del agua que, a la postre, llega a los ríos y lagos. Los suelos alcalinos (por ejemplo, los ricos en caliza) pueden neutralizar el ácido directamente. En los suelos algo ácidos (típicos de los bosques de coníferas, perennifolios, de Europa, Canadá y Estados Unidos), expuestos a la lluvia ácida, los efectos de esta deposición pueden sufrir mena por acción de otros dos procesos: el ácido queda inmovilizado a medida que el suelo y la vegetación retienen los iones sulfato y nitrato (de los ácidos sulfúrico y nítrico, respectivamente), o el ácido se neutraliza merced a un proceso de intercambio de cationes (iones positivos).

Cuando la escorrentía o las aguas subterráneas acidificadas vierten en un lago o un río sus efectos dependen de su capacidad para neutralizar los ácidos.

Una masa de agua puede contener bicarbonato y otros iones básicos procedentes de la meteorización de la roca, capaces de neutralizar una entrada de ácido, impidiendo que el pH caiga por debajo de un valor en torno a 5. La concentración de estos iones neutralizadores recibe el nombre de capacidad de neutralización de ácidos (CNA), cuyo valor ofrece una medida de la sensibilidad de un lago a la acidificación. Un lago con una CNA muy alta está protegido contra la lluvia ácida, al menos de momento. Un lago con una CNA de cero se mantendrá sano en tanto permanezca alejado de la lluvia ácida; de lo contrario, cualquier entrada de ácido lo acidificará de inmediato.

#### 1.4.3.-ROTURA DE LA CAPA DE OZONO POR LOS COMPUESTOS ORGANO - HALOGENADOS (CLOROFUORCARBONOS)



En los últimos años se ha prestado una gran atención a las previsible consecuencias que para el medio ambiente podrían producir el uso de los productos organohalogenados en general y los clorofluorometanos, CFC13 y CF2C12, en particular. Actualmente se empieza a plantear también la posible implicación de NO y N02.

La primera preocupación es debida a que estas sustancias son suficientemente estables en la baja atmósfera para acumularse en ella y en un periodo de varios años alcanzar la estratosfera, donde como resultado de reacciones fotoquímicas con radicales libres se producirían átomos de cloro libre. Estos átomos de cloro formarían parte en una serie de complicados procesos químicos con los constituyentes de la atmósfera, de los cuales resultaría un decrecimiento importante del contenido de ozono en la estratosfera. Las reacciones que tienen lugar son esquemáticamente las siguientes:



Ya se indicó anteriormente como el ozono formado en la estratosfera actúa como un filtro sobre las radiaciones ultravioletas que llegan a la superficie de la tierra, protegiendo a los seres vivos que viven en ella.

Si disminuyen las concentraciones de ozono, pasaría mayor cantidad de radiaciones que afectarían a salud humana, produciendo afecciones de la piel (especialmente cáncer y quemaduras), al clima (produciéndose un calentamiento), a la vegetación y a la fauna.

Los clorofluorometanos se emplean fundamentalmente como fluidos refrigerantes, en sistemas de aire acondicionado y como propelentes en envases de aerosol, usados en gran número de productos. Las propiedades físicas de estos productos los hacen especialmente aconsejables para estos usos y su escape a la atmósfera no causa problemas de tipo local al ser químicamente estables, no tóxicos y no inflamables.

Gran cantidad de estudios se están llevando a cabo sobre este tema y aunque todavía hay incertidumbres, parece que son tres las causas posibles de alteración de la capa de ozono:

- La utilización de clorofluorometanos (parece ser la causa fundamental).
- El empleo masivo de fertilizantes en las actividades agrícolas.
- Las emisiones de grandes cantidades de óxidos de nitrógeno a gran altura por los aviones supersónicos.

Se ha calculado que una disminución del 1/100 en la concentración del ozono produce un aumento del 2 por ciento de radiaciones ultravioletas, lo que significa que si continuamos emitiendo estos productos al nivel actual en un periodo comprendido entre 50 a 100 años la capa de ozono se habrá reducido alrededor del 15 %, aumentando las radiaciones ultravioletas en un 30 por ciento.

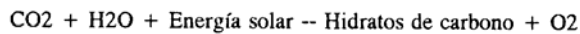
Este incremento de radiación produciría un aumento apreciable de casos de cáncer de piel en los seres humanos y efectos negativos sobre los organismos y los ecosistemas, al ser ciertos tipos de placton vegetal, animales invertebrados y algunos vertebrados en determinadas etapas, especialmente sensibles a la radiación ultravioleta.

#### 1.4.4.- EFECTOS DE INCREMENTO DE LA CONCENTRACION DE CO<sub>2</sub> EN LA ATMOSFERA SOBRE EL CLIMA. EFECTO INVERNADERO

Entre las alteraciones de la atmósfera producidas por las actividades humanas una de las que preocupa principalmente en la actualidad es la causada por las crecientes emisiones de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera, procedentes de la utilización de combustibles fósiles.

El CO<sub>2</sub> no es un gas tóxico ni se considera un contaminante como tal, es un componente natural del aire. El problema surge del hecho de que concentraciones crecientes de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, pueden causar cambios climáticos al verse afectada la temperatura de la corteza terrestre.

El dióxido de carbono es un elemento que forma parte del ciclo del carbono. Las plantas a través de la fotosíntesis utilizan la energía solar haciendo reacciones el CO<sub>2</sub> del aire con el agua para producir hidratos de carbono y oxígeno, según la reacción:



Cuando las plantas respiran, absorben el oxígeno del aire liberando de nuevo CO<sub>2</sub> a la atmósfera. La reacción es la inversa de la anterior.

El balance total de este ciclo nos llevaría a concentraciones constantes de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, pero este ciclo se altera como consecuencia de las actividades humanas, las alteraciones se manifiestan con la tala de bosques y los incendios forestales, lo que disminuye las plantas disponibles, o al quemar los combustibles fósiles. La primera y la segunda de estas actividades disminuyen la capacidad de la naturaleza para eliminar el CO<sub>2</sub> atmosférico, y la segunda y tercera aumentan su cantidad emitida a la atmósfera.

Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera presentan una tendencia a aumentar continuamente, al menos desde 1.958 en que se han realizado mediciones muy precisas de su evolución.

Se puede observar las variaciones estacionales debidas al ciclo natural de crecimiento y decaimiento de las plantas (ciclo fotosintético).

El efecto de calentamiento de la corteza terrestre se debe a que el CO<sub>2</sub> lo mismo que el vapor de agua, deja pasar (es transparente) la radiación solar recibida del sol, pero absorbe la radiación infrarroja reflejada por la tierra, lo que puede dar lugar a un calentamiento de las capas bajas de la atmósfera. El efecto es igual que el que producen los tejados de vidrio en un invernadero, de ahí su nombre.

Según cálculos realizados, se estima que si se duplica la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, las temperaturas en la troposfera inferior aumentarían entre 2 y 3°C. Se ha pensado que este incremento de la temperatura podría producir un incremento en la fusión de los casquetes de hielo y de los glaciares. Este hecho podría dar lugar a que muchas áreas costeras quedaran sumergidas por las aguas.

No obstante, si se comparan la evolución de la temperatura media mundial y el aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, se aprecia que entre los años 1.885 y 1.940 la temperatura media mundial aumentó en 0,5°C, sin embargo desde este año se ha observado un descenso de unos 0,2°C en todo el mundo. Esta evolución puede verse en la figura adjunta.

## **2.-EMISIONES DE CONTAMINANTES.**



## 2.1.-CLASIFICACION SEGUN LAS CARACTERISTICAS

Los contaminantes presentes en la atmósfera, proceden de dos tipos de fuentes emisoras bien diferenciadas: la naturaleza y las antropogénicas.

Los contaminantes emitidos por las fuentes del primer tipo tienen su origen en procesos naturales, mientras que los emitidos por el segundo tipo de fuentes provienen de las actividades humanas.

Los principales focos naturales son: los volcanes que emiten grandes cantidades de partículas y gases, los incendios forestales y la descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos.

Por su parte los principales focos de emisión antropogénicos los podemos clasificar de la forma siguiente:

- Focos fijos
  - Industriales
    - Procesos industriales
    - Instal. combustión
  - Domésticos
    - Calefacciones
- Focos móviles:
  - Aeronaves
  - Buques
  - Vehículos automóviles
- Multifocos
  - Zonas industriales
  - Areas urbanas

Por lo que se refiere a los óxidos de nitrógeno se han estimado en 20 millones las toneladas de este contaminante que se emiten anualmente a la atmósfera en Europa.

Otra circunstancia a tener en cuenta, es que las emisiones que proceden de las actividades humanas, por lo general se concentran en las áreas urbanas o en sus proximidades, acercando los contaminantes a los receptores.

## 2.2.-FOCOS FIJOS

Por sectores, entre los que tienen un mayor potencial contaminante se encuentran:

- Industrias energéticas:
  - Centrales térmicas.
  - Refino de petróleo.
- Siderurgia :
  - Siderurgia integral.
  - Fundiciones de hierro y acero.
  - Ferroaleaciones.
- Metalurgia no férrea :
  - Aluminio.



- Cobre.
- Plomo y zinc.
- Industria del cemento.
- Química inorgánica:
  - Acido sulfúrico.
  - Acido nítrico.
- Química orgánica.
- Industria paraquímica :
  - Abonos complejos principalmente
- Industria del papel.
- Industria alimentaria.

### **2.3.-FOCOS MOVILES.**

En los últimos años el automóvil ha aparecido de forma masiva en las ciudades, contribuyendo a incrementar los problemas de contaminación atmosférica como consecuencia de la emisión de gases de escape. Los principales contaminantes emitidos por los vehículos son: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, inquemados, partículas y compuestos de plomo.

Las emisiones de un vehículo dependen del tipo de motor que utilice, de la cilindrada, y de las condiciones de uso.

### **2.4.-FOCOS DE TIPO AREA (MULTI-FOCOS)**

A este tipo de focos corresponden las zonas industriales y/o las áreas urbanas. Se caracterizan porque en ellas existen focos de emisión de los tipos antes considerados e incluyen las calefacciones domésticas.

Las calefacciones domésticas son una de las principales fuentes de contaminación en las grandes áreas urbanas. Su contribución al problema de la contaminación atmosférica en estas áreas puede alcanzar entre un 20 y un 30% de las emisiones totales. Las emisiones dependen del número de focos individuales que existan, del tamaño de estos y del tipo y calidad de los combustibles utilizados.

El saneamiento de los focos del tipo área (multifocos) es una tarea muy compleja por la gran cantidad y diversidad de focos implicados. Por lo general, la forma de abordar este problema es mediante la elaboración de Planes de Saneamiento Atmosférico en los que se contemple la naturaleza y el origen de la contaminación, se identifiquen los principales focos de emisión, y se proponga un programa de medidas correctoras a ejecutar, distinguiendo entre los sectores transporte, industria y doméstico.

## **2.5.-OLORES EN EDAR: GENERACION, MEDIDA Y CORRECCION**

### **2.5.1.-INTRODUCCION**

Los problemas de contaminación del aire no están centrados exclusivamente en los compuestos tóxicos o con impacto ambiental de mayor o menor envergadura, sino también afectan al confort, tales como ruidos, radiaciones electromagnéticas u olores.



El olor está considerado por la legislación como una forma específica de contaminación ambiental, dado que no sólo constituye una molestia y, por tanto, un empeoramiento de la calidad del aire, sino que en muchos casos los olores están asociados a sustancias contaminantes.

### 2.5.2.-¿QUÉ ES EL OLOR?

Las sensaciones olfatorias son difíciles de describir y de clasificar, sin embargo, se han realizado clasificaciones fijándose en los elementos químicos asociados a los olores de las sustancias.

En cualquier caso el olor es una sensación que se produce al ser estimulado el sistema olfativo por un compuesto oloroso.

Los diferentes tipos de respuesta ante un estímulo olfativo dependen de las características del olor recibido y a su vez estas características son subjetivas de cada individuo, ya que el grado de sensibilidad olfativa es diferente para cada persona.

Para que produzca olor deberán concurrir las siguientes circunstancias:

- Ser compuesto volátil
- Absorbible por la superficie sensitiva del epitelio
- Ausente normalmente de la región olfativa

Ciertas investigaciones indican la existencia de siete olores primarios: alcanfor, almizcle, flores, menta, éter (líquidos para limpieza en seco, por ejemplo), acre (avinagrado) y podrido. Estos olores primarios corresponden a siete tipos de receptores existentes en las células de la mucosa olfatoria.

Las investigaciones sobre el olfato señalan que las sustancias con olores similares tienen moléculas del mismo tipo. Estudios recientes indican que la forma y no los constituyentes de las moléculas que originan los olores determinan la naturaleza del olor de esas moléculas o sustancias.

Pueden identificarse los siguientes principios generales relativos a la identificación de olores:

Un mayor olor implica una mayor volatilidad en general

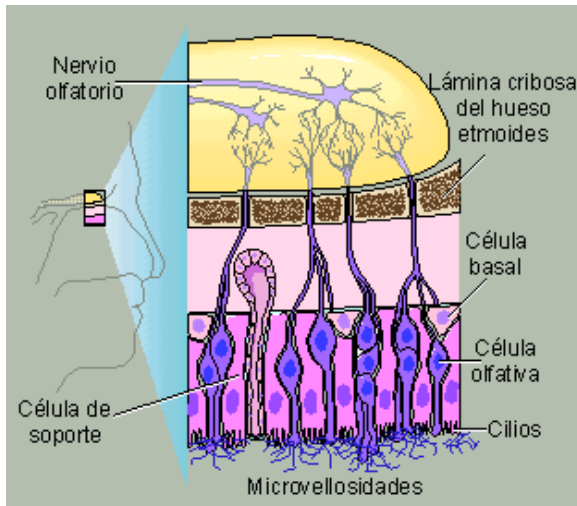
Reactividad química e insaturación dan lugar generalmente a olor

Para los hidrocarburos cíclicos la arquitectura de la molécula y el número de anillos dan lugar a diferentes olores, así:

- 5-6=Almendras amargas y mentol
- 6-9=Olores transitorios
- 9-12=Alcanfor o menta
- 13=Madera o cedro
- 14-16=Azmizcle o duraznos
- 17-18=Algalia
- >18 Ningún olor o muy débil

### 2.5.4.-FISIOLOGÍA DEL OLOR

Las sustancias olorosas se absorben en el moco que cubre el neuroepitelio olfatorio, se difunden a los cilios y se unen reversiblemente a los sitios receptores de la membrana, en donde se piensa que estas moléculas se combinan con células específicas, o con compuestos químicos que están dentro de esas células.



El proceso causa cambios de composición en las proteínas receptoras, que inducen una cadena de fenómenos bioquímicos que generan potenciales de acción en las membranas primarias en donde la intensidad parece estar codificada por la cantidad de descargas en las neuronas aferentes.

Poco se sabe de la "calidad" de codificación, pero las células receptoras individuales responden a una gran variedad de estímulos, por lo que se piensa que en cada célula hay más de un tipo de sitio receptor.

Los receptores olfatorios son muy sensibles, pero se fatigan con facilidad, ello explica que se estimulen por olores poco intensos, y también que los olores muy intensos dejen de percibirse después de un tiempo relativamente breve.

Por último, la captación de los olores es el primer paso de un proceso más largo que continúa con la transmisión del impulso a través del nervio olfatorio y acaba con la percepción del olor por el cerebro.

Esto último puede modificar sensiblemente la percepción o sensación a causa tanto de circunstancias personales como sociales.

### 2.5.5.-MEDIDA DEL OLOR

Debido a la magnitud del problema y a su impacto social son numerosos los estudios referentes al análisis tanto cuantitativo como cualitativo de los compuestos generadores de olor.

La emisión de olor puede definirse como el producto del caudal de la fuente de olor ( $Q$ ) por la concentración de dicho olor ( $C_o$ ), esto es:

$$E = Q \times C_o$$

Pero, la determinación del caudal  $Q$  no resulta viable a menos que este esté confinado en un espacio concreto, esto es se trate de una emisión canalizada como es el caso de la ventilación.



En los restantes casos es necesario recurrir a estimaciones.

En cuanto a la concentración, los métodos de la determinación de la concentración de olor se han ido perfeccionando desde los procedimientos olfatómétricos más sencillos hasta modernas técnicas que hacen uso de sofisticada instrumentación.

Las técnicas instrumentales se enfrentan, no obstante, con los siguientes inconvenientes:

- Periodos de muestreo largos
- Dificultades en separar los compuestos

Por lo que, en la práctica, y salvo que el olor sea generado por un único compuesto no alterado, son los métodos olfatómétricos los más utilizados.

Los métodos olfatómétricos están basados en la percepción del olor por parte de la población (lo cual es completamente subjetivo pero sumamente práctico), así se define la concentración umbral de olor ( $C_{UO}$ ), a la concentración de una sustancia odorífera para la cual no es percibida por el 50% de la población.

La unidad de olor (UO) puede ser definida como la cantidad de sustancia odorífera que cuando se dispersa en la unidad de volumen (1 m<sup>3</sup>) de aire sin contaminar deja de ser percibida por el 50% de la población, y en consecuencia se hace prácticamente indetectable para un observador normal.

Así si llamamos  $C_{UON}$  al umbral de olor medio mundial de una sustancia específica (ASTM Standard D-1391-57), se tiene que:

$$1 \frac{UO}{m^3} = C_{UON}$$

Con las condiciones anteriores, podemos ya definir la concentración de olor ( $C_o$ ) como el número de diluciones necesarias para llegar al  $C_{UON}$ , esto es:

$$C_o = 1 + \frac{\text{Volumen de aire puro}}{\text{Volumen muestra de aire}}$$

Los métodos olfatómétricos tienen la desventaja de ser extremadamente lentos, por lo que es muy difícil disponer de resultados completamente fiables para un conjunto de habitantes.

En estos casos puede ser muy útil efectuar estudios de olores combinando métodos olfatómétricos con técnicas analíticas, en las que se efectúa el análisis de un solo componente del aire como el carbono orgánico total (COT), los hidrocarburos o el sulfuro de hidrógeno.

Así centrándonos en el caso de la depuración de aguas residuales, la concentración de olor en una determinada área podría representarse como:

$$C_o = m \times C_{SH_2}^n; \text{ en donde } C_{SH_2} = \text{concentración } SH_2 \text{ en ppm}$$

## 2.5.6.-OLOR E HIGIENE INDUSTRIAL



En algunas ocasiones los compuestos odoríferos son a la vez tóxicos a determinadas concentraciones (en el límite todos lo son aunque solo sea por desplazamiento del oxígeno).

En general los compuestos tóxicos suelen ser percibidos ( $C_{ou}$ ) mucho antes de que alcancen concentraciones tóxicas, pero en algunos casos esto no es así, o bien ambas concentraciones están muy próximas.

En la tabla siguiente se muestran las concentraciones umbral de toxicidad y de percepción para algunas sustancias.

eoi

COMPONENTES	UMBRAL DE TOXICIDAD		UMBRAL DE PERCEPCION (K-50)*	
	ppm	mg/m <sup>3</sup>	ppm	mg/m <sup>3</sup>
Acetaldehído	100	180	0,21	0,38
Acido Acético	10	25	1,0	2,5
Acido Butírico			0,001	0,004
Acido Clorhídrico	5	7	10,0	15
Acetona	1000	2400	100	240
Acroleína	0,1	0,25	0,21	0,49
Acronitrilo	20	45	21,4	47
Amoníaco	25	18	46,8	33
Anilina	5	19	1	3,8
Benceno	10	32	4,68	15
Bromo	0,1	0,7	0,047	0,3
Cloro	1	3	0,314	0,9
Cloruro de Alilo	1	3	0,47	1,5
Cloruro de Benzóilo	1	5	0,047	0,24
Dimetilamina	10	18	0,047	0,085
Dimetil Formamida	10	30	100	300
Dióxido de Azufre	5	13	0,47	1,2
Acrilato de Etilo	25	100	0,00047	0,0019
Etilmercaptano	0,5	1,25	0,001	0,0025
Formal Dehído	2	3	1,0	1,2
Metil Etil Cetona	200	590	10,0	29
Metil Isobutil Cetona	100	410	0,47	1,9
Metil Mercaptano	0,5	1	0,0021	0,0042
Metil Metacrilato	100	410	0,21	0,85
Monoclorobenceno	75	350	0,21	0,97
Monometilamina	10	12	0,021	0,027
Nitrobenceno	1	5	0,0047	0,024
Paracresol	5	22	0,001	0,0044
Paraxileno	100	435	0,47	2
Percloretileno	100	670	4,68	32
Fenol	5	19	0,047	0,18
Peridina	5	15	0,021	0,067
Estireno	100	420	0,047	0,2
Sulfuro de Carbono	20	60	0,21	0,65
Sulfuro de Dimetilo			0,001	0,0025
Sulfuro de Hidrógeno	10	14	0,00047	0,00066
Tetracloruro de Carbono	10	65	100	650
Tolueno	100	375	2,14	8,1
Tricloretileno	100	535	21,4	115
Trimetilamina			0,00021	0,0005

Nótese el caso del amoníaco (presente en las aguas residuales) con un umbral de percepción 46.8 ppm. muy superior a los 25 ppm. de umbral.

Obviamente la toxicidad no depende únicamente de la concentración sino también de la exposición a la misma.

Así, según la Agencia norteamericana de higienistas ambientales (ACGIH; <http://www.acgih.org>), existen los siguientes umbrales de exposición a partir de los cuales no existe garantía acerca de los efectos sobre la salud (lo que no es lo mismo que existir riesgo de muerte):



- TLV – TWA: media ponderada en el tiempo, concentración límite para una jornada normal de 8 horas y 40 horas semanales.
- TLV –STEL: límite de exposición de corta duración (15 minutos), se trata de una evaluación complementaria de la anterior .
- TLV-C : concentración límite que no se puede sobrepasar en ningún momento.

Los límites TLV son actualizados todos los años.

### 2.5.7.-OLORES EN LAS EDAR

Existen algunas actividades industriales que son potencialmente generadoras de olor, que pueden catalogarse en tres grupos:

- Tratamiento de aguas residuales urbanas (EDAR).
- Tratamiento de subproductos de origen animal (Rendering) (fábricas de harina de carne o pescado).
- Tratamiento de residuos sólidos urbanos (R.S.U.) (basuras, compostaje, vertederos).

Cada uno de ellos tiene una problemática distinta y hace que el sistema de desodorización sea distinto para cada actividad.

En el caso de las aguas residuales los olores se generan como consecuencia de la degradación de materias orgánicas y minerales tanto por procesos biológicos como por oxidación-reducción.

Los principales causantes de malos olores son los compuestos azufrados, omnipresentes en las aguas residuales y que provocan deterioros importantes en las redes de saneamiento.

Los compuestos nitrogenados (amoníaco, aminos, proteínas, urea etc) son también otra fuente importante de malos olores.

Las causas principales de formación de malos olores en las EDAR pueden ser clasificadas del siguiente modo:

- Naturaleza del efluente, cargado de materia orgánica o con vertidos industriales malolientes.
- Red de saneamiento cuyo diseño favorezca las fermentaciones (tiempo de permanencia superior a 3 horas o velocidad baja). Estas fermentaciones se potencian cuando la temperatura es alta y la carga orgánica elevada.
- El tipo de tratamiento en la EDAR, así como la concepción de las instalaciones (caídas de agua, desengrasadores, o zonas muertas).
- Las condiciones de explotación (tiempo de retención elevado en los espesadores)



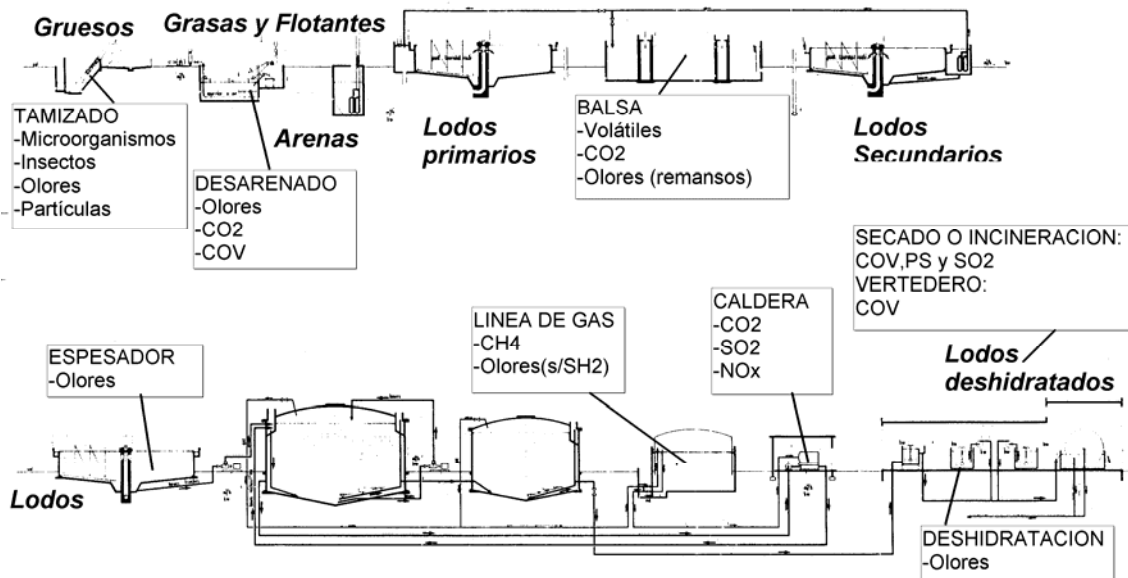
En la tabla siguiente se muestran las intensidades de olor típicas en las distintas etapas de tratamiento:

ETAPA	INTENSIDAD, I (UD/M3)
Agua bruta	45
Acumulación y desbaste	85
Desarenado	60
Decantación primaria	55
Pozo de lodos primario	85
Tratamiento biológico	
Alta carga	60
Media carga	50
Carga débil	30
Decantación secundaria	30
Pozo de lodos secundario	45
Espesador de lodos	200
Local de deshidratación de lodos	400

Los compuestos fundamentales presentes en los olores de EDAR urbanas son:

- Sulfuro de hidrógeno en concentraciones de 10 a 100 mg/m<sup>3</sup>
- Mercaptanos con aproximadamente 0.1 a 1 mg/m<sup>3</sup>
- Amoniacaco en concentraciones de hasta 20 mg/m<sup>3</sup>
- Aminas de 3 a 6 mg/m<sup>3</sup>
- Indol y Escatol (compuestos de pronunciado olor fecal) en concentraciones de 10 a 30 µg/m<sup>3</sup>.

En la figura siguiente se muestra el esquema de una EDAR típica con digestión anaerobia de fangos, con indicación de las operaciones en las que se generan olores u otros impactos sobre la atmósfera.



En cuanto a las EDAR industriales, los compuestos emitidos son muy variables según la actividad. En la tabla siguiente se muestran algunos ejemplos típicos para distintos sectores:

INDUSTRIA	AZUFRADOS	NITROGENADOS	OXIGENADOS	ACIDOS ALCOHOLES	DISOLVENTES	INTENSIDAD (UD/M3)
QUIMICA						
Farmacia		Acronitrilo		Fenoles Acroleina Alcoholes	Aromaticos Clorados	715000
Insecticidas	H <sub>2</sub> S					
Perfumes			Aldehidos Cetonas			
PETROLEO						
Aguas residuales	H <sub>2</sub> S Mercaptanos	NH <sub>3</sub>			Hidrocarburos	
SIDERURGIA						
Aguas residuales	H <sub>2</sub> S				Aromaticos	1070-207400
TEXTIL		Aminas	Formaldehido		Solventes	1200-1800
PAPEL	H <sub>2</sub> S Otros azufrados					
AGRICOLAS						
Pescado		NH <sub>3</sub> Aminas		Acidos Grasas		150000-400000
Mataderos	H <sub>2</sub> S Otros azufrados	NH <sub>3</sub> Aminas	Aldehidos	Acidos Grasas		6000-1350000
Granjas porcinas	H <sub>2</sub> S Otros azufrados	NH <sub>3</sub>	Aldehidos	Acidos Grasas		

### 2.5.8.-ELIMINACIÓN DE OLORES

Hay dos aspectos que van a influir decisivamente en la selección y dimensionamiento del sistema de depuración:

- El olor es producido por una o varias sustancias químicas determinada de carácter tóxico que se pueden medir, en cuyo caso se trata de problema tipo de contaminación ambiental regulado por la legislación, y cuya acción correctiva consiste en reducir su emisión a los límites permitidos por esta.
- El otro caso es cuando el olor no es tóxico sino molesto, y esta constituido por numerosas sustancias difíciles de cuantificar. En este caso la acción correctiva no está bien delimitada ya que de lo que se trata es simplemente de que no moleste, y dado el carácter subjetivo del olor que hemos mencionada puede ser causa de litigios con los afectados.

El olor puede eliminarse mediante las siguientes técnicas:

- Absorción
- Incineración
- Adsorción
- Tratamiento biológico
- Enmascaramiento

Pasemos a continuación a estudiar en detalle cada una de estas técnicas.

#### **LAVADORES QUÍMICOS POR ABSORCION**

Uno de los sistemas de desodorización más utilizados es el de la oxidación química de los compuestos causantes de los malos olores.

Existen situaciones en las que el olor viene causado por una mezcla de compuestos susceptibles de ser oxidados y también neutralizados, mediante soluciones de lavado ácidas o alcalinas según sea necesario.

El proceso consiste en utilizar un reactivo oxidante en un equipo de absorción de gases. Se combina, de una parte, la absorción física del gas en el líquido y la reacción química de otra, siendo el conjunto de ambos fenómenos la solución más eficaz para el caso de compuestos causantes de malos olores.

Los productos de la oxidación son sustancias que no huelen o que son fácilmente absorbidos en una segunda torre.

Como reactivos de oxidación existe una amplia gama, pero los más utilizados industrialmente son:

- Permanganato potásico.
- Hipoclorito sódico en medio alcalino.



- Peróxido de hidrógeno (agua oxigenada).
- Ozono.

El más utilizado en general es el hipoclorito sódico, los otros oxidantes químicos como son el peróxido de hidrógeno, el ozono y el permanganato potásico son más caros y a menudo no son altamente oxidantes.

El permanganato potásico aunque sea es agente oxidante bueno, es un método caro de lavado químico. El subproducto generado es dióxido de manganeso, que provoca disfunciones en el sistema de operación y es caro en términos de eliminación del residuo sólido.

El peróxido de hidrógeno es a veces preferible al hipoclorito al no ser peligroso y no dar lugar a la cloración y la emisión de cloro. Sin embargo, su poder oxidante es más bajo y es necesario activarlo; por ejemplo, usando radiación UV u ozono. Estos sistemas combinados son caros para operar.

En cualquier caso la elección del producto químico adecuado para efectuar el lavado en las torres de absorción dependerá del tipo o tipos de compuestos que producen olor.

El caso más simple es cuando un solo componente es el causante del olor; por ejemplo, amoníaco o sulfuro de hidrógeno.

Ante estas situaciones es probable que una única torre sea suficiente para eliminar el olor, usando un lavador ácido (con ácido sulfúrico) en el caso del amoníaco y un lavador básico (con hipoclorito y sosa) para eliminar el sulfuro de hidrógeno.

Sin embargo, encontrarse un caso en el que sólo sea un compuesto el que produce el olor es bastante inusual, normalmente el olor producido por un proceso (tratamiento de aguas, curtido de pieles, etc.) es una compleja mezcla de compuestos que requieren para su tratamiento de un sistema de lavado en varias etapas

#### **a) Sistema de dos etapas**

Del tipo oxidación – neutralización de 2 etapas consta de dos torres de lavado en serie, conectadas entre sí mediante conductos.

En la primera torre se efectúa un lavado con un reactivo oxidante (hipoclorito sódico u otro), mientras que en la segunda tiene lugar la neutralización química con una solución alcalina (hidróxido sódico).

El gas a lavar entra por la parte inferior de la primera torre, impulsado por un ventilador que proporciona el caudal y presión necesarios para aspirar el aire y hacerlo pasar por las dos torres.

#### **b) Sistema de tres etapas**

El aire a desodorizar en depuradoras de aguas presenta como sabemos amoníaco, sulfuro de hidrógeno y mercaptanos. En este caso, es necesario que la instalación conste de tres lavados: ácido, oxidante y básico.

La primera etapa, de lavado ácido, elimina los olores básicos como aminas y amoníaco.

La segunda etapa, lavado con hipoclorito, elimina los olores oxidables como el sulfuro de hidrógeno.

La tercera etapa, lavado con sosa cáustica, elimina los olores debidos a los cloruros producidos en la

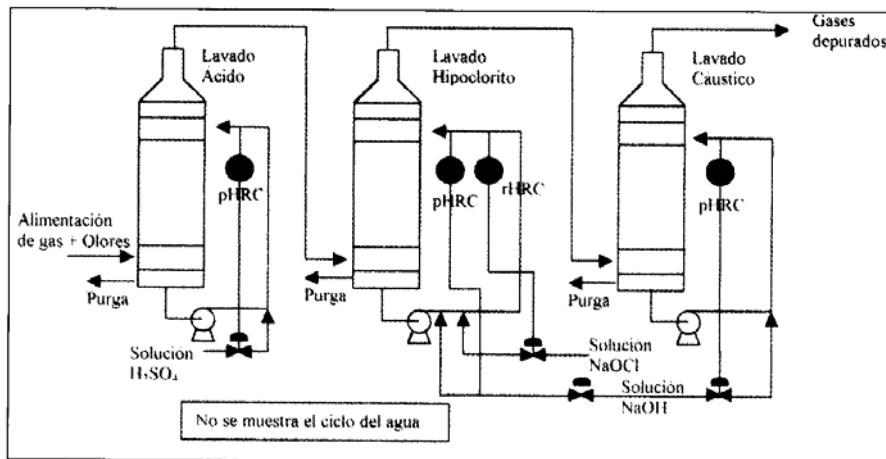
segunda fase (pH bajos producen la descomposición del hipoclorito a cloro).

Lógicamente, si no hay olores básicos, la primera etapa no es necesaria.

El fundamento de la instalación es idéntico al sistema de dos torres, si bien ciertos parámetros de diseño y también constructivos cambian. Por ejemplo, la pérdida de carga que debe vencer el ventilador es mayor y esto se traduce en motores de mayor potencia.

Asimismo, es posible combinar las dos últimas etapas utilizando una torre de lavado con hipoclorito y sosa al mismo tiempo.

La eficacia de esta torre de absorción puede ser difícil de controlar si los compuestos olorosos están en altas concentraciones o son muy variables, requiriendo para ello una alta concentración de hipoclorito.



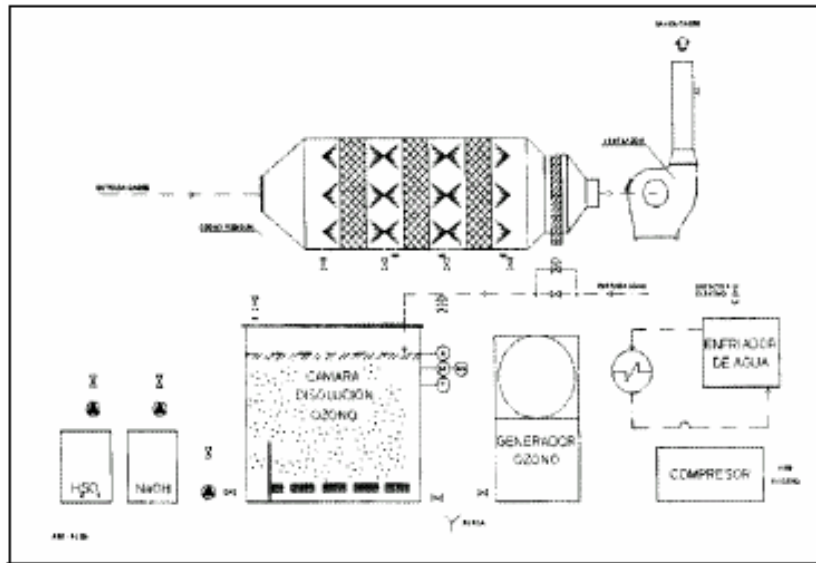
Mención especial merece los lavadores de ozono una moderna tecnología que ha evolucionado mucho en los últimos años, que tiene una buena efectividad y un amplio campo de aplicación en la desodorización industrial.

Una instalación de lavado con ozono se compone de:

- Generador de ozono.
- Cámara de disolución.
- Equipo de lavador absorción-oxidación.

El ozono se obtiene de forma industrial mediante una descarga eléctrica a alto voltaje en presencia de aire seco u oxígeno.

Teniendo en cuenta que el ozono es un gas tóxico incluso en concentraciones muy bajas (como no tiene olor por sí mismo es muy difícil de detectar, por lo que sus fugas son muy peligrosas) el generador debe ser de alta calidad, de forma que garantice la tasa de ozono necesaria, así como de los controles de seguridad y regulación que se precisan.



### Lavador con ozono

Por otra parte, es imprescindible una buena disolución en agua, lo que requiere un cuidado diseño de cámara de disolución ya que es un gas poco soluble.

El ozono residual no disuelto en la cámara de disolución se incorpora a la entrada del absorbedor para su aprovechamiento en la fase de absorción y para evitar fugas de ozono.

No obstante, la reacción entre el ozono y el compuesto oloroso es escasa, ya que es muy improbable que puedan tener contacto, al estar tanto los compuestos olorosos como el ozono en unos niveles de concentración muy bajos.

Los lavadores de ozono suelen ser caros sobretodo por el costo del generador.

El ozono sólo no es un agente oxidante muy bueno y necesita en algunas ocasiones una activación por combinación con  $H_2O_2$  o UV.

Aunque debe efectuarse una purga periódica del agua, ni el reactivo residual ni los productos de reacción oxidados tienen carácter contaminante y no necesitan de tratamiento específico.

### ADSORCION

Los filtros de carbón activo son ampliamente conocidos, incluso a escala doméstica, normalmente en forma cassettes o tejidos impregnados de carbón activo.

Estos equipos son muy eficaces en aplicaciones en las que se tratan pequeños caudales de aire (cuando la emisión de olores está por debajo de 0,5 kg/h), pero son poco rentables para desodorizar emisiones industriales, de mayor caudal, en términos de costes de reemplazo del adsorbente.

Los dos medios más usados normalmente en medios de adsorción son el permanganato potásico impregnado de alúmina y el carbón.



El primero es bastante caro y normalmente resulta poco económico con cargas de olor bajas (<0,5 kg/h). No obstante, no es tan sensible a la humedad como lo son los sistemas de carbón.

Generalmente, los sistemas de permanganato potásico se usan si el olor principal se debe al H<sub>2</sub>S.

Los carbones activos poseen la propiedad de adsorber, que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido, llamado adsorbente, atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas llamadas adsorbatos, y que están contenidas en un líquido o en un gas.

El carbón activo desde el punto de vista químico es un compuesto prácticamente idéntico al resto de los compuestos de carbono (diamante, grafito, negro de humo, carbones minerales o de leña).

La diferencia entre el carbón activo y el resto carbones es su estructura atómica que le confiere su principal característica: una gran área superficial, base de su alta capacidad adsorbente. El área de la mayoría de los carbones activados comerciales está entre 500 y 1.000 m<sup>2</sup>/g.

Existen muchos tipos de carbón disponibles en el mercado. El carbón estándar suele ser sensible a la humedad, por lo que se necesita un deshumidificador para asegurar la eficacia de la operación. Sin embargo, hay carbones catalíticos impregnados (KOH) que no tienen este problema.

La procedencia del carbón activo es variada, pero la turba y la cáscara de coco son las fuentes más comunes y tienen la propiedad de retener la mayor parte de los compuestos causantes de malos olores.

Cuando se dimensiona una torre de depuración con carbón activo hay que tener en cuenta la pérdida de carga que la columna de carbón representa y también la corriente a depurar que debe estar exenta de cantidades elevadas de agua y de polvo pues el carbón se obtura con facilidad.

Debido a la sencillez de los equipos y al bajo coste de mantenimiento, este tipo de instalaciones se ha convertido en un estándar, siendo muy utilizadas en eliminación de olores de depuradoras, imprentas, pozos de bombeo y otros.

El carbón activado puede regenerarse por vía química o térmica.

Para la regeneración química puede utilizarse vapor pero existen experiencias de regeneración con NaOH en carbones destinados a adsorber H<sub>2</sub>S. La eficiencia de la regeneración química y el número de ciclos de regeneración depende de los componentes del gas tratado.

La regeneración térmica se lleva a cabo en los hornos de los fabricantes donde se somete al carbón a altas temperaturas, cercanas a los 1000 C, en atmósfera inerte o reductora durante un tiempo predeterminado.

En algunos casos concretos como ciertas industrias químicas la regeneración puede efectuarse con aire caliente introduciendo este último como aire de combustión en calderas u hornos.

## **SISTEMAS BIOLÓGICOS**

Los sistemas biológicos de lavado requieren que los olores sean transferidos desde la fase gaseosa hasta la fase líquida antes de ser destruidos por los microorganismos. De este modo, la destrucción efectiva de los componentes se determina por su solubilidad y por el porcentaje en el que son eliminados por la destrucción biológica.

Al ser el tratamiento biológico un sistema vivo, éste opera más efectivamente si la carga de olor es relativamente constante respecto a los compuestos tratados y sus concentraciones.

Cuando se pone en marcha un sistema biológico para el tratamiento de los olores, éste necesita un cierto tiempo hasta conseguir el rendimiento de diseño del sistema, ya que, durante este período, los microorganismos han de crecer hasta su nivel óptimo.

Si se da una concentración de los compuestos a eliminar superior a la normal (a la de diseño de la instalación), o si se da un cambio en alguno de los compuestos presentes en el gas a depurar, puede darse una mortandad de los microorganismos, bajando el rendimiento del sistema.

Durante el período que dure la renovación de los microorganismos y su crecimiento hasta llegar a su equilibrio óptimo, se dará una emisión de los compuestos olorosos no eliminados, con los consecuentes problemas que ello puede representar.

Existen básicamente dos tipos de sistemas biológicos:

- Biofiltros
- Lavadores biológicos

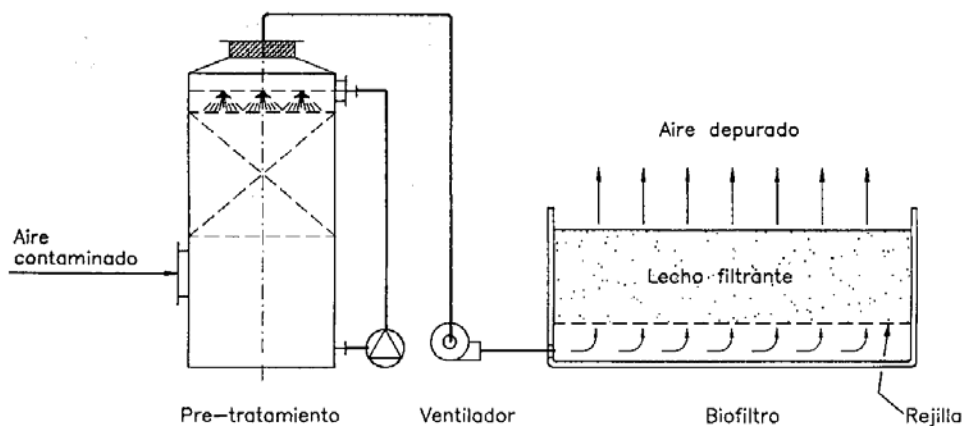
Los biofiltros son considerados como la forma más barata de tratar corrientes de gas con olor. En sus formas más simples, los biofiltros consisten esencialmente en una caja rellena de algún tipo de medio (corteza, piel de coco, etc.) donde la biomasa se sustenta.

El aire a depurar pasa por una primera etapa, en donde se eliminan las partículas para evitar problemas de taponamiento y reducción de la superficie útil.

A continuación, el gas se trata para adecuarse a la temperatura y humedad óptimas.

Por último, la corriente de aire, se introduce a través del relleno biológico a una velocidad que permita que los microorganismos puedan eliminar el olor, y convertir los contaminantes en  $\text{CO}_2$ , agua y biomasa.

Los sistemas biológicos se deben conservar húmedos para conseguir que el tratamiento sea satisfactorio.

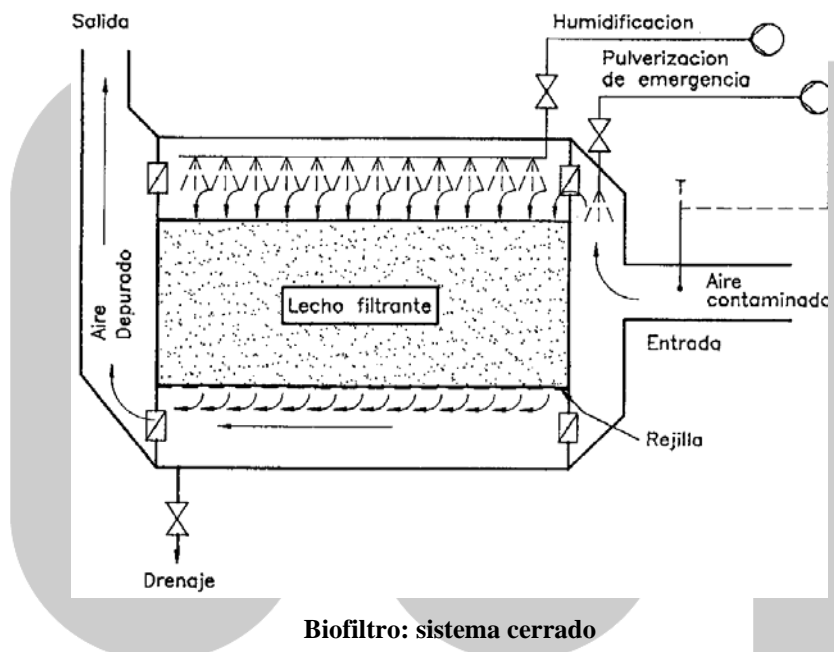


- i/ Biofiltro de tipo abierto



Para la elección de un sistema biológico deben considerarse los siguientes factores:

- Tipos de soporte de biomasa:
  - Relleno de tipo orgánico (suelo, compost, turba, corteza, etc): tienen flora microbiana natural y los nutrientes necesarios.
  - Rellenos de tipo inorgánico (también pueden servir de soportes para rellenos orgánicos): el carbón activo, puede adsorber parte del contaminante, y prevenir posibles efectos tóxicos para los microorganismos. También se utilizan por su facilidad de montaje rejillas de polipropileno.
- Temperatura y humedad: a mayor temperatura de la corriente, mayor evaporación del agua presente en el relleno. La temperatura de trabajo viene determinada por el tipo de microorganismo y habitualmente llega hasta unos 35-40° C.



En cuanto a los lavadores biológicos, consisten en una torre a través de la cual un medio acuoso es recirculado, y en la que los microorganismos usados para tratar el olor se distribuyen en algún tipo de soporte dentro del principal cuerpo de la torre.

Una de las limitaciones más importantes de los lavadores biológicos es que pueden colapsarse si no se mantienen correctamente.

El colapso es debido a que la biomasa puede llegar a ser demasiado pesada para la estructura de soporte especialmente donde la carga de olor es alta (téngase en cuenta que los microorganismos utilizan los olores como nutrientes para su crecimiento).

Hay sistemas disponibles que permiten solucionar este problema con una técnica de eliminación del lodo generado, manteniendo una constancia en la calidad y peso de la biomasa.

Estos sistemas que, lógicamente, son más complicados tanto en su uso como mantenimiento, dan un producto sólido residual y requieren una cierta experiencia de operatividad con respecto a los sistemas



biológicos tradicionales.

Las dimensiones relativas de los lavadores biológicos tienden a ser más grandes que en los sistema de tratamiento químico para la misma función, debido sobretodo al mayor tiempo de contacto requerido dada la menor solubilidad de los compuestos olorosos en medio acuoso cuando no hay reacción química (algunos compuestos no pueden ser tratados con sistemas biológicos debido a problemas de insolubilidad de las especies tratadas).

Esto puede ser un problema donde la limitación de espacio es un factor a considerar, con lo que aumenta el coste.

En general, los sistemas biológicos son poco costosos de operación al no ser necesaria la adición de productos químicos.

No obstante, debe tenerse en cuenta que el mantenimiento de los mismos debe ser más intenso para que opere efectivamente, manteniendo su eficacia en el tiempo. Así, por ejemplo, es necesario que periódicamente se renueve el biofiltro para prevenir colapsos, cosa que puede suponer un gran costo de mano de obra.

Las aplicaciones más usuales de los sistemas biológicos son las depuradoras, instalaciones de compostaje, fábricas de subproductos animales con niveles medios de sulfuro de hidrógeno y mercaptanos y, en general, en aquellas instalaciones en que se desprenden olores producto de degradación biológica.

### **ENMASCARAMIENTO**

Los agentes enmascarantes y neutralizantes pueden ser útiles en los casos en los que existe una gran área abierta y donde no resulta posible o económicamente viable vehicular el aire para eliminar el olor (por ejemplo, en corrales de animales).

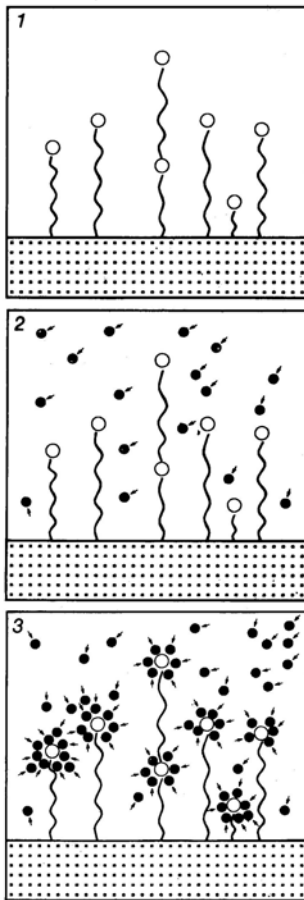


Fig. iAgente Neutralizante

Los agentes enmascarantes, como su nombre indica, cubren el olor, pero no lo destruyen.

Consecuentemente, todos los problemas que pueden ocurrir con la dispersión del ozono/olor también lo son con agentes enmascarantes.

Hay también otros dos efectos que son comunes cuando se usan los agentes enmascarantes.

Algunas veces, el agente enmascarante y el olor se combinan para crear un olor que puede ser más molesto que el propio olor original

Asimismo, hay que tener en cuenta que el olor a fresas o vainilla puede parecer inocuo o hasta agradables si se huele de una forma ocasional, pero también se puede considerar como molesto si invaden un ambiente de una forma continua.

Los agentes neutralizantes actúan de un modo similar pero en este caso se produce una combinación a escala molecular, que impide que la sensación olfativa llegue a los centros receptores.

En cualquier caso, estas técnicas sólo deben de usarse cuando no sea posible aplicar otras, ya que no actúan sobre el origen del olor sino que simplemente lo disfrazan.

## BIBLIOGRAFIA

1. Manual de Higiene Industrial. Fundación Mapfre. 1991
2. Tecnologías para el control de olores. Análisis Comparativo. G. Comadrán y J. Cornella. 2002. Ed. Alción. Pág. 135.
3. Proceedings de la Asamblea General de ANAGRASA 1990. Jaume Martí.
4. Pollution Engineering Practice Handbook. Cheremisinof and Young. Ed. Ann Harbor Science. Pag. 275 y ss.
5. Tecnologías de desodorización industrial. P. Sadurní. Ingeniería Química. Abril 2000.
6. Filtros biológicos en la depuración de gases. Casals Cardona Industrial. 1998.

## 3.-LEGISLACION



Aunque el estudio detallado de la legislación española y comunitaria en materia de contaminación atmosférica desborda los límites del presente texto, vamos a indicar a continuación los aspectos más significativos de la normativa actual.

La legislación española en materia de contaminación atmosférica data del año 1972 en el que se promulga la Ley de Protección del Medio Ambiente Atmosférico<sup>1</sup>.

Esta ley fue desarrollada posteriormente por el Decreto 833/75, núcleo todavía de la legislación actual tanto en emisiones como en inmisiones, y dos órdenes ministeriales, una de ellas acerca del régimen de las instalaciones potencialmente contaminadoras de la industria (Orden de 18 de Octubre de 1976) y otra (Orden de 10 de Agosto de 1976) en la que se especifican las técnicas analíticas para la determinación de inmisiones.

Los límites de emisión se adjuntan en el cuadro siguiente.

Asimismo, y a efectos comparativos se muestran las regulaciones de las legislaciones alemana, norteamericana y japonesa.

A partir de estas fechas, se abre un paréntesis legislativo<sup>2</sup>, hasta 1985, fecha en la se aprueba el RD 1613/1985 de 1 de Agosto, por el que se establecen nuevas normas de calidad del aire en materia de contaminación por SO<sub>2</sub> y partículas (transposición de una directiva europea), y posteriormente en 1987 para el NO<sub>2</sub> y el Plomo (RD717/87 de 27 de Mayo).

---

<sup>1</sup> En las tablas que se adjuntan se muestran los aspectos fundamentales de las normas que se citan.

<sup>2</sup> Se publican algunas disposiciones relacionadas con beneficios para la puesta en práctica de medidas correctoras (RD2512/78), procedimiento analíticos en inmisiones, y otras de escasa aplicación a los objetivos del presente capítulo.



La primera disposición en materia de emisiones fuera del 833/75, aparece en el Real Decreto 646/1991 de 22 de Abril<sup>3</sup> sobre limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (más de 50 MW térmicos).

Este RD excluye explícitamente a las turbinas de gas y a los motores alternativos independientemente del combustible utilizado, que serán objeto de una legislación específica.

La normativa recoge los nuevos límites de emisión para SO<sub>2</sub>, partículas y óxidos de nitrógeno en el caso de nuevas instalaciones de combustión (autorización a partir de 1 de Julio de 1987).

Estos límites (que se muestran en el gráfico adjunto) se dan en función de la potencia de la instalación y de los combustibles empleados para generar energía.

Aunque estos límites de emisión sólo son aplicables para instalaciones de cogeneración basadas en calderas de vapor y dentro del rango de potencia especificado, es conveniente tenerlas especialmente en cuenta por cuanto constituyen una orientación acerca de los límites que establecerá una futura directiva europea en materia de emisiones de motores y turbinas.

Por otra parte las instalaciones de cogeneración, están incluidas a menudo dentro de las instalaciones industriales sujetas a Evaluación de Impacto Ambiental.

La reglamentación de ámbito estatal al respecto figura en el RD sobre EIA (RD 1302/1986 de 28 de Junio) y su reglamento de ejecución (RD 1131/1988 de 30 Septiembre).

Aunque en estas disposiciones únicamente se exige EIA a las instalaciones de combustión de más de 300 MW térmicos, la legislación de muchas comunidades autónomas ha reducido substancialmente dicho límite, incluyendo en muchos casos instalaciones de cogeneración de pocos MWe.

---

<sup>3</sup> Adaptación de la Directiva 88/609/CEE de 24-11-88



No podemos concluir este apartado, sin mencionar otras disposiciones con implicación medioambiental aunque no directamente relacionadas con las emisiones de gases.

La primera de ellas es el Reglamento de Actividades Molestas Insalubres Nocivas y Peligrosas (RAMINP, Decreto 2414/1961 de 30 de Noviembre), cuyo desarrollo es actualmente competencia de las comunidades autónomas.

El RAMINP tiene relación con las emisiones atmosféricas por cuanto establece límites de concentración de sustancias en el interior de las instalaciones industriales<sup>4</sup>.

Asimismo el Decreto 833/75 establece que en el caso de que el Anexo IV, no especifique un límite de emisión para una determinada sustancia se considere 1/30 de la concentración máxima en interiores del RAMINP como inmisión máxima generada en el entorno.

Por último es necesario mencionar las limitaciones legales existentes en materia de ruidos, aspecto este de singular importancia en las instalaciones de cogeneración basadas en turbinas de gas y motores alternativos.

En lo que respecta a los niveles sonoros en el interior de las explotaciones el RD 1316/1989 sobre Protección de los Trabajadores frente al Ruido, establece en función del nivel sonoro equivalente las obligaciones en materia de protección y evaluación higiénica periódica de los trabajadores.

Fuera de las instalaciones industriales el nivel sonoro está limitado por las Ordenanzas Municipales, las cuales limitan las inmisiones en función del uso de las distintas áreas.

---

<sup>4</sup> Dichos límites referidos a los TLV de la ACGIH de 1960, están actualmente obsoletos. El criterio seguido por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo es considerar los que anualmente actualiza la ACGIH

## 4.-EVALUACION Y MEDIDA DE EMISIONES

### 4.1.-CONCEPTOS BASICOS

Las emisiones gaseosas suelen expresarse en partes por millón (ppm) medida que se refiere al número de centímetros cúbicos del gas que existen en un metro cubico de aire, con lo que un 1% de concentración equivale a 10000 ppm.

La tendencia actual, no obstante, es a utilizar prioritariamente las relaciones peso/volumen; la mas utilizada es la que relaciona el microgramo ( $1 \mu\text{g} = 10^{-6}$  gramos) o el miligramo ( $1 \text{mg} = 10^{-3}$  gramos) contaminante por metro cúbico.

Para convertir de ppm a microgramos/ $\text{m}^3$  hay que hacer uso únicamente de la ley de los gases perfectos :

$$m = nM = \frac{pM}{RT}V$$

donde:

p = presión

V= volumen

n = n.º de moléculas

M= masa molar

m = masa del gas

R = constante de los gases (0.082 atm-m<sup>3</sup>/kmol-K)

T = temperatura absoluta en K

permite pasar de p.p.m. a mg/ $\text{m}^3$  (multiplicando por  $pM/RT$ ) y de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a p.p.m. (multiplicando por  $RT/pM$ )

Las tablas que se adjuntan para facilitar la tarea, muestran los factores que se usan para la conversión entre sí de estas unidades, para varios contaminantes, relacionados con las instalaciones de combustión<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Como ejemplo, evalúese la concentración de CO en mg/ $\text{m}^3$  a 25 C y 1 atm. De un gas de escape que contiene un 1.5% en volumen (Resultado : 17100 mg/ $\text{m}^3$ )

**Factores de conversión de p.p.m. a mg/m<sup>3</sup>**  
 $1 \text{ p.p.m.} = A \text{ } \mu\text{g/m}^3$  (a la temperatura T y a 1 atmósfera)

	<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>O<sub>3</sub></i>	<i>NO<sub>2</sub></i>	<i>NO</i>	<i>CO</i>
<i>T</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
0° C	2,86	2,14	2,05	1,34	1,25
5° C	2,81	2,11	2,02	1,32	1,23
10° C	2,77	2,07	1,99	1,29	1,21
15° C	2,72	2,04	1,95	1,27	1,18
20° C	2,67	2,00	1,91	1,25	1,16
25° C	2,62	1,96	1,88	1,23	1,15
30° C	2,57	1,92	1,85	1,20	1,12

**Factores de conversión de  $\mu\text{g/m}^3$  a p.p.m.**  
 $1 \text{ mg/m}^3 = B \text{ p.p.m.}$  (a la temperatura T y a 1 atmósfera)

	<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>O<sub>3</sub></i>	<i>NO<sub>2</sub></i>	<i>NO</i>	<i>CO</i>
<i>T</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
0° C	0,350	0,467	0,487	0,747	0,800
5° C	0,356	0,475	0,495	0,760	0,815
10° C	0,362	0,483	0,505	0,774	0,830
15° C	0,368	0,491	0,514	0,788	0,845
20° C	0,375	0,500	0,523	0,801	0,860
25° C	0,382	0,509	0,532	0,815	0,874
30° C	0,389	0,517	0,541	0,829	0,889

Las mediciones deben ser comparables, por lo que para homogeneizar las medidas usadas, es necesario que los volúmenes de cada gas vengan dados en condiciones equivalentes de temperatura y presión.

La legislación española usa la expresión m<sup>3</sup>N para indicar que se trata de un metro cúbico en condiciones normales de presión y temperatura (0° C, 760 mmHg).

A veces las concentraciones se establecen en partes por billón ( 1 ppm = 1000 ppb).

#### 4.2.-GENERALIDADES SOBRE TECNICAS DE MEDIDA

La determinación de concentraciones de contaminantes atmosféricos, afecta a dos campos principalmente: Emisión (fuentes estacionarias o móviles) e Inmisión (ambiente).

Aunque las técnicas de análisis suelen ser similares en emisión e inmisión, no es así con las técnicas de toma de muestra que son diferentes.

Puede darse el caso de que para la valoración de una emisión determinada deban utilizarse técnicas de muestreo propias de las inmisiones.

Este sería el caso de las llamadas fuentes difusas o erráticas (por ejemplo pila de material granulado a la intemperie), en las que se mide la inmisión en los alrededores.





También puede darse el caso inverso, es decir valorar las emisiones de focos canalizados (chimeneas) como inmisiones.

Este caso menos frecuente y de gran complejidad (es necesario utilizar modelos de difusión), se daría en el caso en que no se dispusiese de reglamentación que limite las emisiones pero si las inmisiones (recordemos que el Decreto 833/75 prevé esta circunstancia).

Por último puede darse el caso de que un determinado foco ( o multifoco) no pueda valorarse por ninguna de las técnicas citadas, en cuyo caso se recurre generalmente a bases de datos sobre factores de emisión (EPA y Corine Air, ya citada, son las más populares).

En España no se dispone todavía de métodos oficiales de medida de emisiones<sup>6</sup>, por cuando el Decreto 833/75 y disposiciones conexas establece únicamente los relacionados con inmisiones.

Tradicionalmente, se ha venido haciendo uso de los métodos establecidos por la Environmental Protection Agency (EPA) norteamericana los más importantes de los cuales se muestran en el cuadro adjunto.

Asimismo suelen utilizarse a menudo las British Standards (británicas), las normas UNI (italianas dado que hay gran número de sondas de dicha procedencia) y las UNF (francesas).

Por último, los laboratorios realizan adaptaciones de procedimientos respaldados por la ACGIH, OSHA o NIOSH (todos ellos organismos norteamericanos en materia de higiene industrial), o las elaboradas por el INSHT, aunque todas ellas hacen referencia a las inmisiones.

No obstante, además de las medidas de carácter legal para las que es necesario hacer uso de métodos con respaldo oficial, el usuario debe realizar mediciones de carácter interno, por las cuales puede hacer uso de técnicas que no necesariamente son menos precisas que las anteriores.

## FASES DE LA DETERMINACION DE NIVELES DE CONTAMINACION

En el caso más general, la determinación de niveles de contaminación, comprende las siguientes etapas:

- **TOMA DE MUESTRAS:**

La toma de muestras incluye la selección del punto de medida, de cuya elección depende, la representatividad de la muestra.

Preparación del punto de muestreo. Separación de una porción representativa del gas objeto de estudio. En el caso de análisis de Laboratorio, la toma de muestra incluye también la separación del contaminante del seno del gas segregado, normalmente mediante retención en un absorbente en fase líquida o sólida.

Es la etapa quizás más importante y, en algunos casos (isocinéticos), especialmente dedicada. El posterior tratamiento que se da a la muestra tomada, no tendrá valor alguno si aquella no es representativa del gas que se pretende analizar.

Por lo general, el análisis se realiza extrayendo una muestra representativa de dicho gas, en cuyo caso se denomina extractivo. Si, por el contrario, dicho análisis se realiza sobre el gas sin necesidad de segregar una porción de él, se denomina "in situ". Un ejemplo evidente de determinación in situ es la medida de la temperatura.

---

<sup>6</sup> Salvo en las últimas disposiciones relacionadas con la incineración de residuos.

La toma de muestra se realiza, generalmente, de forma continua, tanto si el análisis posterior se lleva a cabo de forma automática o manualmente en el Laboratorio. En el primer caso, el análisis se realiza en tiempo real, obteniéndose valores instantáneos. Cuando se realiza en Laboratorio, al que ha de llevarse la muestra recogida, el valor obtenido corresponde a la media de las concentraciones en el tiempo de toma de muestra.

De la buena selección del punto de toma de muestra y emplazamiento físico del reparto, dependerá, obviamente, la obtención de una muestra representativa.

- **ACONDICIONAMIENTO :**  
Adecuación del caudal de gas aspirado a las condiciones de funcionamiento de los monitores automáticos o de su absorción mediante borboteadores.  
El análisis automático y la absorción previa al análisis manual, para poder realizarse con precisión, requiere una muestra con unas determinadas características (temperatura, ausencia de partículas en suspensión, humedad, ausencia de otros contaminantes que puedan interferir, etc). El acondicionamiento es, pues, otra etapa importante previa al análisis.
- **ANÁLISIS :**  
Evaluación cuantitativa del contaminante objeto de estudio. Puede realizarse a posteriori, en un laboratorio o en campo, de forma automática mediante monitores.  
Es la etapa que más versatilidad ofrece, ya que para cada determinación existe un sistema alternativo de soluciones válidas.

#### 4.3.-CLASIFICACION DE LAS TECNICAS DE MEDIDA

Las técnicas de análisis se pueden dividir en dos grandes grupos, según se realice en laboratorio o automáticamente..

También pueden clasificarse en técnicas extractivas y técnicas in situ.

Por último previo al analisis puede efectuarse una dilución de la muestra (para poder emplear los equipos usados en inmisiones), por lo que cabe hacer una ultima clasificación entre:

- Con dilución :
  - Dilución de alto nivel:Permite el uso de monitores de Procedimientos inmisi3n.
  - Dilución de bajo nivel:Requiere el uso de equipos específicos..
- Sin dilución

Así se tiene una gran número de técnicas extractivas utilizadas para gases (vease tabla adjunta).

CLASIFICACION GENERAL SEGUN :		VENTAJAS	INCONVENIENTES
UBICACION	ACONDICIONAMIENTO		
SIN EXTRACCION (ON LINE)	<b>Sistemas opticos:</b> <i>Sin canaladura (simple o doble paso)</i>	Sin sistema de muestreo Utiliza gas real	Dificultad de calibración Para pequeños diametros Gran cantidad de aire instrumental Hay que instalar dos unidades Ensuciamiento
	<i>Haz optico encamisado</i>	Facilidad de calibración Menor ensuciamiento	Mayor coste.
CON EXTRACCION <b>CONTINUA</b> <b>DISCONTINUA</b>	<b>Sistemas fisico-químicos</b> <b>Con enfriamiento (seco)</b>	Facilidad de calibración	Alto costo de mantenimiento La muestra no es real
	<b>En caliente (húmedo)</b>		Necesario sistema de transporte
	<b>Extracción con dilución</b>		

Entre las técnicas in situ para gases la técnica más frecuentemente utilizada es la de espectroscopia de correlación mediante célula de gas (espectroscopia de segunda derivada), específica tanto para SO<sub>2</sub> como para NO.

La espectroscopia usual es la U.V. otras posibilidades son el infrarrojo y el láser.

La técnica de espectroscopia mide los cambios de absorción de la luz U.V. por moléculas gaseosas, en determinadas longitudes de onda para los que el gas es más opaco. En el entorno de esa longitud de onda se mide la variación o derivada del espectro. Midiendo la segunda derivada se logra más sensibilidad y especificidad (los equipos de segunda derivada miden simultáneamente SO<sub>2</sub> y NO).

Para las partículas las técnicas extractivas más habituales son el opacímetro convencional y absorción de la radiación β (ambas serán descritas más adelante).

Entre las técnicas in situ más empleadas para las partículas están los opacímetros ópticos o por ensuciamiento en los que se mide la luz que pasa a través de un cristal sometido a los humos durante un tiempo determinado, antes y después de limpiarse el cristal.

$$\text{Opacidad} = 1 - \frac{I}{I_0}$$

$I_0$  = Luz emitida

$I$  = Luz recibida tras pasar el conducto de gases.

$$C \text{ (mg/m}^3\text{N)} = \frac{\ln(I_0/I)}{KL}$$

$K$  = Ct del tipo de humo

$L$  = Recorrido del rayo de luz

Se determinan

empíricamente

En la tabla adjunta se muestran las ventajas e inconvenientes de las distintas técnicas de toma de muestra (con extracción o sin extracción) y acondicionamiento (en caliente, con enfriamiento, con dilución etc)

Para la toma y acondicionamiento de muestras tanto en emisión como en inmisión pueden hacerse las siguientes consideraciones generales :

- EMISIÓN :

Según se trate de evaluar contaminantes gaseosos o polvo, la selección del punto de toma de muestra en una chimenea o conducto, variará sustancialmente.

En el caso de contaminantes gaseosos, se buscará preferentemente un punto donde la mezcla de gases sea lo más homogénea posible. La existencia de turbulencia, coadyuva a la obtención de muestras representativas.



Por el contrario, si lo que se pretende analizar es polvo, el posterior análisis es más simple y más representativo si la localización del punto de toma de muestra se realiza en puntos cuyo régimen sea laminar.

En el caso de contaminantes gaseosos la toma de muestras puede hacerse mediante tuberías termoeléctricas, a fin de evitar condensaciones (en seco), la muestra se transporta desde el punto de toma de muestra a un tren de acondicionamiento donde sufre las siguientes operaciones:

- Filtración y eliminación de partículas sólidas.
- Enfriamiento.
- Eliminación de condensados y humedad.

Pasando a continuación, según se trate de análisis automático o manual, a un monitor automático o a un tren de absorción.

En el caso de las partículas el muestreo en emisión, se realiza de forma discontinua y en condiciones de isocinetismo. En este caso no existe el transporte del gas, ya que la sonda se introduce directamente en la chimenea.

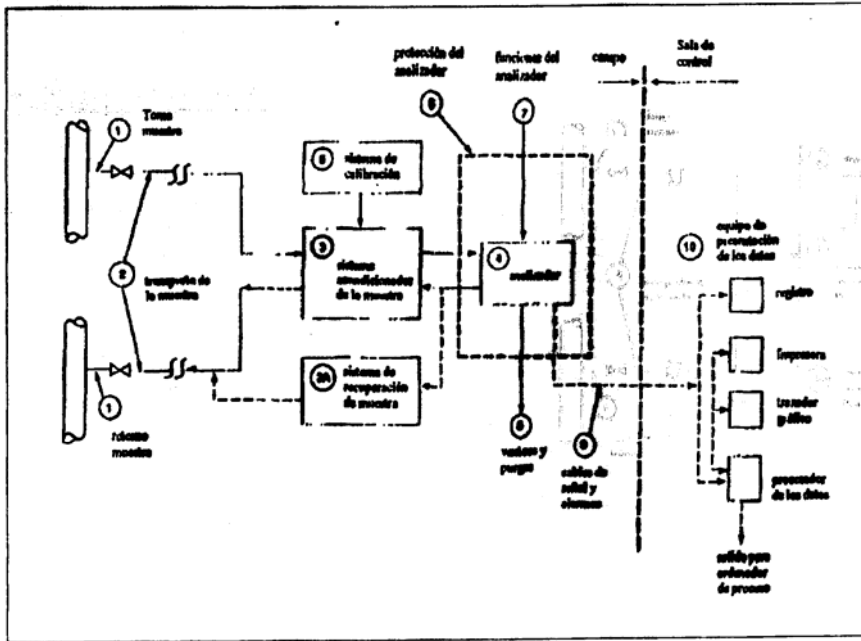
- INMISIÓN.

Más que de localización del punto de toma de muestra, ahora se debe de hablar de ubicación de los aparatos de medida. Se deberán de buscar emplazamientos que reflejen las condiciones reales del aire ambiente de la zona.

El acondicionamiento de la muestra, al ser la temperatura ambiente, queda reducido a la eliminación del polvo en suspensión y, eventualmente, de la humedad. Un simple filtro integral resuelve el primer problema.

Una vez acondicionada la muestra, al igual que para emisión, pasa bien a un monitor o a un tren de absorción.

Cuando lo que se pretende analizar es partículas, ha de hacerse distinción según se trate de partículas en suspensión o sedimentable. En ambos casos, no existe acondicionamiento previo y los procedimientos de toma de muestra forman parte integrante del propio análisis, por lo que se comentarán en dicho apartado.



eoi

## 4.4.-MUESTREO ISOCINETICO

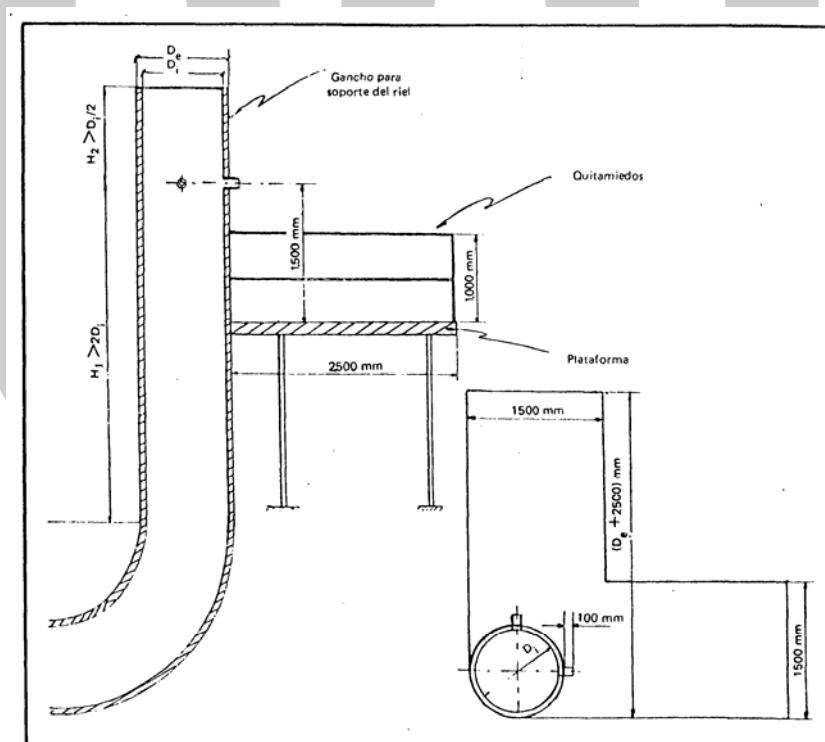
### 4.4.1.-PREPARACION DEL PUNTO DE MUESTREO

El responsable de una planta está obligado a realizar medidas periódicas de emisión de contaminantes, tanto por imperativo legal (Decreto 833/75 que se desarrollará más adelante) como por necesidades de operación.

En cualquier caso, es necesario, prever a nivel de proyecto los requisitos que debe reunir la instalación para albergar los equipos de medida.

Esta preparación del punto de muestreo, es de capital importancia cuando el contaminante a muestrear son partículas, para las que se requiere muestreo isocinético.

La descripción detallada de este tipo de muestreo se muestra en los apartados siguientes, baste decir que cada medición suele requerir unas 2 horas, y es necesario desplazar hasta el punto de medición (que debe estar situado en un tramo vertical suficientemente alejado de codos, reguladores, y escape) un equipo de dos personas y 50 kg. aproximadamente en instrumentación.



Teniendo en cuenta que estas mediciones deben realizarlas empresas especializadas (ECA) al menos una vez al año, se comprende la necesidad de facilitar la medida con objeto de minimizar el costo.

En las figuras adjuntas, se muestran las características que debe reunir un punto de muestreo tipo elaborado según las indicaciones de la Orden de 18-10-76.

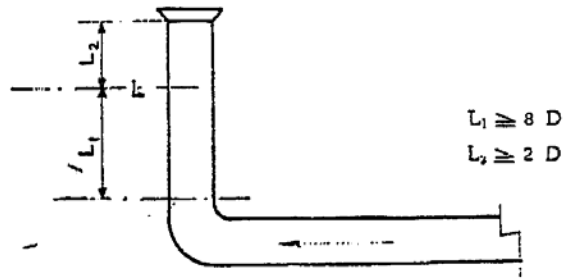
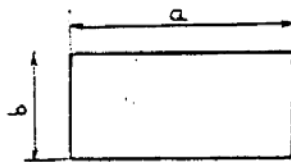


Figura 1

Si la chimenea tiene sección rectangular, se determinará su diámetro equivalente de acuerdo con la ecuación:

$$D_e = 2 \frac{(a \times b)}{a + b}$$



CU



#### 4.4.2.-CONCEPTO DE ISOCINETISMO

La determinación de la concentración de partículas en fuentes estacionarias, exige al objeto de obtener valores representativos, la extracción de muestras en condiciones isocinéticas. Ha de realizarse pues la toma de muestra a una velocidad  $V_n$  igual a la velocidad de los gases en el conducto en que se mide  $V_s$ , tal y como puede apreciarse en la figura adjunta.

En el caso A se observa que para  $V_n > V_s$  la concentración de partículas en la muestra, es inferior a la del conducto  $C_m > C_s$ , debido a que, por su mayor inercia, las partículas de partículas son menos afectadas por la mayor succión que el aire, produciéndose una mayor aspiración de aire que de partículas.

Por el mismo motivo, en el caso B en que  $V_n < V_s$ , la expansión afecta preferentemente al aire y no a las partículas de partículas, con lo que  $C_m > C_s$ . Cuando  $V_n = V_s$ , caso C, se observa que  $C_m = C_s$ , siendo la muestra tomada totalmente representativa.

La condición de isocinetismo, debe mantenerse durante todo el tiempo que dure la toma de muestra.

Durante el tiempo de toma de muestra  $V_s$  varía, por lo que es necesario medirla de forma continua al objeto de lograr una  $V_n$  que varíe de igual forma.

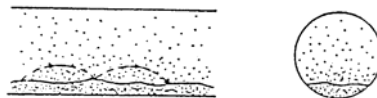
La distribución de velocidades en la sección de un conducto circular, varía según se trate de régimen laminar o turbulento

El conocimiento del perfil de distribución de velocidades en el conducto, es indispensable a la hora de realizar una medida de concentración de partículas.

Es evidente, que el realizar la toma de muestra en un punto en que el régimen sea laminar, facilita enormemente el trabajo al ser mucho más fácil el ajustar las velocidades de forma que  $V_s = V_n$  a lo largo de la sección.

A veces, cuando el régimen laminar es muy perfecto, una única medida a una distancia de  $Diam/3$  de la pared del conducto, distancia a la que corresponde la velocidad integral media, es suficiente para lograr valores representativos de la concentración de partículas.

El efecto de la distribución heterogénea del partículas en la sección, se hace más acusado cuando las medidas se realizan sobre conductos horizontales donde, tal como muestra la figura siguiente, la concentración de partículas es mucho mayor en la parte inferior, debido a la deposición de partículas por efecto de la gravedad.



Es relativamente frecuente, en instalaciones mal reguladas, la existencia de lechos de partículas sedimentario. En estas condiciones es totalmente imposible el pretender realizar medidas de





concentración, aun cuando se tomen todas las precauciones posibles. Existe un arrastre de partículas sobre la superficie del lecho depositado, que crea una corriente de partículas ficticia de concentración mayor a la real, y que ocupa una zona de la sección considerada.

En estos casos, es necesario proceder a realizar la medida en otros puntos y/o nunca, dar por válida una medida realizada en estas condiciones.

#### 4.4.3.-SONDA ISOCINETICA Y MATERIAL AUXILIAR

Los equipos de toma de muestra disponibles en el mercado y fabricados de acuerdo con la norma V de la E.P.A., constan de las siguientes partes :

- A.- Una sonda de toma de muestra, calentable mediante resistencia eléctrica, provista de un tubo de pitot tipo D y tres boquillas de 1/4, 3/8 y 1/2 pulgadas. Un juego de boquillas completo, comprendiendo valores intermedios, es aconsejable.
- B.- Una unidad de muestreo, comprendiendo:
- 1.- Una cámara calentable en cuyo interior se alojan: - Un ciclón con tolva y un By-pass para el mismo - Un filtro integral
  - 2.-Una caja refrigerada mediante hielo en la que se alojan cuatro borboteadores con sus conexiones.
- C.- Una unidad de control que incluye:
- Una bomba de vacío.
  - Un contador de gas seco.
  - Manómetros diferenciales.
  - Un orificio calibrado.
  - Un indicador de vacío.
  - La conexión eléctrica a la red.
- D.- Un cordón umbilical que conecta eléctrica y neumáticamente la unidad de muestreo a la de control.
- E.- Un nomógrafo para la consecución de las condiciones de isocinetismo.
- F.- Una variedad de conexiones entre la sonda y las dos partes de la unidad de muestreo, entre el tubo de pitot y la unidad de control, etc.

En la unidad de muestreo se dispone de dos medidores de temperatura, uno de la temperatura a la que se regula la cámara calentable, mediante un reóstato, y otro la temperatura de salida de los gases tras el cuarto borboteador.

La unidad de control dispone de los siguientes indicadores:

- Temperatura de los gases en la chimenea.
- Temperatura de la sonda (regulable).
- Temperatura antes y después del contador de gas seco.
- Presión dinámica en el tubo de pitot S ( P).
- Presión dinámica en el orificio calibrado ( H).
- Volumen medido en el contador de gas seco.
- Controlador de tiempo de muestreo.

Así como de los mandos de control y ajuste del caudal de aspiración y los interruptores de todas las conexiones eléctricas.

Para la realización de las medidas isocinéticas, a parte de la sonda propiamente dicha, son necesarios los siguientes elementos auxiliares:

- Un cubo cerrado para el transporte del hielo.
- Un termopar y un potenciómetro para la medida de la temperatura de los gases en la chimenea (caso de no estar incluido en la sonda).
- Un tubo de pitot standard, un manómetro diferencial para la localización del punto de toma de muestra.
- Papel de filtro de fibra de vidrio Gelman tipo A, de dimensiones adecuadas al tamaño del filtro a emplear. Pueden llegar a hacer falta hasta tres papeles de filtro por medida en el caso de grandes concentraciones de polvo.
- Un estuche de plástico para guardar los papeles de filtro antes y después de cada medida.
- 200 gr de silica-gel, para desecar los gases una vez borboteados. Cada determinación consume prácticamente los
- 200 gr contenidos en el cuarto borboteador.
- 200 ml de agua destilada, 100 para cada uno de los dos primeros borboteadores.
- 250 gr de acetona para la limpieza interior de la sonda al final de cada medida, al objeto de recuperar el polvo adherido en su interior.
- Una botella para la acetona y otra para el agua destilada.
- Una balanza para posar la silica-gel antes y después de la medida, así como el papel de filtro.
- Un vaso de 200 ml graduado para medir el agua destilada inicial y el condensado recogido.
- Cuatro botellas de por lo menos 500 ml. resistentes a los ácidos, para recoger el agua destilada y el condensado,
- así como la acetona utilizada en la limpieza del filtro y la sonda.
- Unas pinzas para extraer el papel de filtro del filtro.
- Un analizador Orsat para determinar la composición de los gases.
- Cepillos para la limpieza de la sonda.
- Hojas normalizadas para apuntar los resultados.
- Equipo de protección personal (monos antiácido, guantes, botas, mascarillas, etc).

En las figuras adjuntas se muestran distintos accesorios de sonda isocinética tanto para el Método nº V como para el nº XVII (filtro en cabeza, sujeto a ciertas limitaciones).

#### 4.4.4.-DETERMINACION DEL NUMERO DE PUNTOS

El número de puntos distribuidos a lo largo de la sección transversal en los que se deberán realizar tomas de muestra, al objeto de lograr una medida representativa, es función del tipo de régimen reinante en aquella.

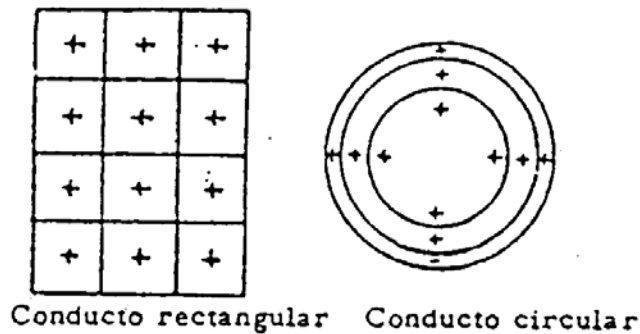
Este régimen será función de la distancia entre el punto de toma de muestra y el punto en el que se produjo la última perturbación en el caudal, como consecuencia de codos, válvulas, variaciones de sección, empalmes, etc, tanto en el sentido del flujo, como en sentido contrario.

Cuanto más próximo se encuentre el punto de muestreo de la perturbación tanto corriente arriba como abajo, mayor es el número de puntos requerido.

El óptimo se sitúa cuando la relación entre A (distancia a la boca de la chimenea) y B (distancia a una perturbación corriente abajo) es de 1 a 4.

En la tabla adjunta se da, para secciones circulares, las distancias en porcentaje del diámetro a la que deberán localizarse cada uno de los puntos de muestreo alineados sobre un diámetro.

La figura siguiente, muestra cómo se repartirían sobre la sección para el caso de 12 puntos de muestreo, según se trate de sección rectangular o circular.



#### 4.4.5.-PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE UN MUESTREO ISOCINETICO

##### ACTIVIDADES PREVIAS A LA MEDICION

1. PREPARACION DEL PUNTO DE MUESTREO : ACCESO, TUBOS ROSCADOS, ELECTRICIDAD.
2. DETERMINACION DE DIAMETROS Y ALTURAS.
3. PESADO Y DESECACION DE FILTROS. ROTULACION
4. PESADO DE BARBOTEADORES SECOS
5. LLENADO DE LOS BARBOTEADORES Y PESADO DE LOS MISMOS.
6. PREPARACION DE LA CAMARA FRIA
7. TEST DE ESTANQUEIDAD

##### ACTIVIDADES PREVIAS AL MUESTREO

8. ANALISIS DE GASES Y DETERMINACION DEL PESO MOLECULAR
9. DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES
10. PERFIL DE VELOCIDADES Y SELECCION DE LA BOQUILLA
11. DETERMINACION DE LA HUMEDAD

##### MUESTREO

12. COMPROBACION DE ESTANQUEIDAD
13. COLOCACION DEL FILTRO
14. EN CADA PUNTO : MEDIDA DE VELOCIDAD Y DETERMINACION DEL CAUDAL.

##### PRINCIPALES PROBLEMAS DURANTE EL MUESTREO



1. FUERA DE RANGO DE PRESION
2. FUERA DE RANGO DE VELOCIDAD POR TURBULENCIAS
3. FALLO ELECTRICO
4. ENTRADA DE AIRE FALSO
5. ROTURA DE FILTRO
6. SATURACION DE LA GEL DE SILICE
7. ROTURA DE BARBOTEADORES

eoi

#### 4.4.6.-RESULTADOS DEL MUESTREO ISOCINETICO DE PARTICULAS

De acuerdo con EPA 1 a 5, en el muestreo isocinético de partículas deben de indicarse :

##### PROPORCION DE VAPOR DE AGUA

$$BWS = V_{wc} + V_{wsg} / (V_{wc} + V_{wsg} + V_{cn})$$

$$V_{wc} = 1.335 \times (W_{fc} - W_{ic})$$

$$V_{wsg} = 1.335 \times (W_{fsg} - W_{isg})$$

BWS = Proporción volumétrica de vapor en gases,

V<sub>wc</sub> = Volumen de vapor condensado en barboteadores, l

W<sub>fc</sub> = Peso de agua final en barboteadores, g

W<sub>ic</sub> = Peso de agua inicial en barboteadores, g

V<sub>wsg</sub> = Volumen de vapor retenido en gel de sílice, l

W<sub>fsg</sub> = Peso final gel de sílice, g

W<sub>isg</sub> = Peso inicial gel de sílice, g

V<sub>cn</sub> = Volumen de gas seco en bomba en condiciones standart, NI

##### VELOCIDAD DE LOS GASES

$$V_s = K_p \times C_p \times \text{RCUAD}[T_s / (P_m \times M_d)] \times \text{RCUAD} [ \text{Suma (DP)} / N ]$$

V<sub>s</sub> = Velocidad media de salida del gas, m/s

K<sub>p</sub> = Constante del tubo de Pitot, 34.97 en sistema internacional

C<sub>p</sub> = Coeficiente del tubo de Pitot, 0.85 tipo S.

T<sub>s</sub> = Temperatura absoluta de la chimenea, K

P<sub>s</sub> = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg

M<sub>d</sub> = Peso molecular del gas base húmeda ,g/mol = M<sub>seca</sub> x (1-BWS) + 18 x BWS

DP = Presión diferencial, mm H<sub>2</sub>O

N = Número de puntos

##### CAUDAL DE GASES EN CONDICIONES STANDART

$$Q_{sd} = 3600 \times (1-BWS) \times V_s \times A \times (273 / T_s) \times (P_s / 760)$$

A = Area del conducto, m<sup>2</sup>

##### PORCENTAJE DE ISOCINETISMO

Fiabilidad del muestreo que debe de encontrarse entre 95% y 105%

$$PI \% = (V_m \times T_s \times 100 / (T_m \times F_s)) / A_b \times t \times V_s$$

PI % = Porcentaje de isocinetismo

T<sub>m</sub> = Temperatura de los gases en la bomba, K

F<sub>s</sub> = Fracción seca (1-BWS)

A<sub>b</sub> = Area de la boquilla, m<sup>2</sup>

t = Tiempo de muestreo, s



eoi



4.4.7.-EJEMPLO DE UN INFORME DE MUESTREO ISOCINETICO

PARAMETROS MEDIDOS	Unidad	FUENTE DE EMISION	
		A	B
FECHA	#	20 / 04 / 94	27 / 04 / 94
HORA	#	11:20 am	11:49 am
<b>1. CONDICIONES AMBIENTE</b>			
Temperatura Ambiente (Ta)	°C	28.94	28.71
Presión Atmosférica (Pb)	atm	0.98	0.98
Humedad Relativa (HR)	%	75	75
Humedad del Aire (BWSaire)	%/100	0.02	0.02
<b>2. RESULTADOS DEL MUESTREO</b>			
Nro. de puntos muestreados	#	14	16
Vapor de agua (BWSgas)	%	2	2
Velocidad del gas :			
- Máxima	m/s	21.36	20
- Mínima	m/s	14.54	16.25
- Media (Vf)	m/s	18.24	17.8
Caudal medio del gas (Qs)	m3/s	30.94	29.37
Caudal medio a 0 °C , 1 atm (Qn)	Nm3/s	19.49	20.55
Temperatura del gas :			
- Máxima	°C	64.36	98.87
- Mínima	°C	63.21	95.74
- Media	°C	63.56	96.63
Presión en la Chimenea :			
- Máxima	mmH2O	-68.32	-55.18
- Mínima	mmH2O	-81.58	-68.46
- Media	mmH2O	-46.48	-60.28
Duración Total del Muestreo (ET)	min	56	96
Tiempo de muestreo individual (t)	min	4	6
Desviación del Isocinetismo (DI)	%	5.7	5.5
Volumen de aire seco aspirado (Vcn)	Nm3	0.501	0.933
Peso de polvo captado	g	0.0636	0.0274
<b>CONCENTRACION</b>	<b>mg/Nm3</b>	<b>127</b>	<b>29</b>
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Carga	t/h	95	92

#### **4.5.-ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION**

Entre estas técnicas de medida cabe distinguir las que se realizan en continuo y las de carácter puntual o discontinuo.

Las medidas en continuo se realizan con equipos electrónicos y requieren un acondicionamiento previo de la muestra.

En las tablas adjuntas se muestran las principales técnicas analíticas que se pueden utilizar con los gases de combustión, así como los rangos de medida de las más habituales.



eoí



La medida en continuo de partículas y en particular hollín suele realizarse a menudo con un equipo denominado opacímetro basado en la absorción de la luz por parte de estas.

Otro equipo muy popular en el mercado, está basado en la absorción de la radiación  $\beta$

Ambos sistemas al efectuar la medida de modo indirecto, tienen el inconveniente de requerir calibraciones periódicas con equipos basados en la gravimetría.

Para las medidas discontinuas de gases de combustión<sup>7</sup> suelen utilizarse equipos electrónicos dotados de sensores electroquímicos.

Con estos equipos pueden realizarse medidas rápidas y relativamente precisas de O<sub>2</sub>, CO, NO, SO<sub>2</sub> (también existen sensores para otros gases), y temperatura de los gases.

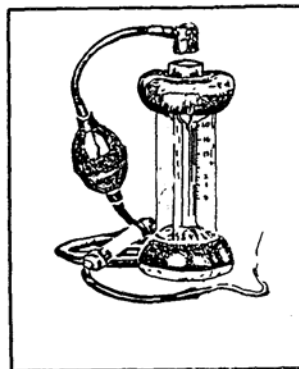
Seleccionando el combustible empleado o bien introduciendo manualmente los parámetros del mismo (generalmente la constante de Sieggert), el equipo puede calcular la concentración de CO<sub>2</sub>, las pérdidas por gases y el rendimiento de la combustión.

Algunos equipos incorporan un portafiltros para evaluar la concentración de partículas de 1 a 10 micras en función del oscurecimiento de papeles filtrantes especiales ( Índice de Bacharach).

#### Medición del CO<sub>2</sub>

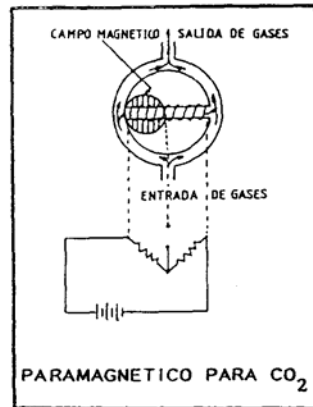
La medición del CO<sub>2</sub> resulta muy adecuada para comprobaciones puntuales del estado de la combustión pero no se emplea para casos de medidores en sistema continuo que son la base de los modernos sistemas de regulación automática de la combustión

El aparato de medición de CO<sub>2</sub> mas empleado y a la vez mas simple está basado en la absorción del CO<sub>2</sub> por una disolución de potasa contenida en el aparato. Tras la absorción se produce un aumento del nivel de líquido que permite determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> existente en el volumen de muestra tomado. La muestra se toma succionando manualmente mediante una pera de goma y un tubo unido al aparato, introducido en el conducto de gases.



<sup>7</sup> El tradicional método d'Orsat es muy poco usado en la actualidad, aunque todavía es imprescindible cuando se desea medir CO<sub>2</sub> no originado en la combustión.

Otros equipos similares se basan en el mismo principio' aportan mayor precisión en la medida, pero son más voluminosos y de manejo algo más complicado. Permiten determinar la composición volumétrica de los gases secos, pudiéndose conocer las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.



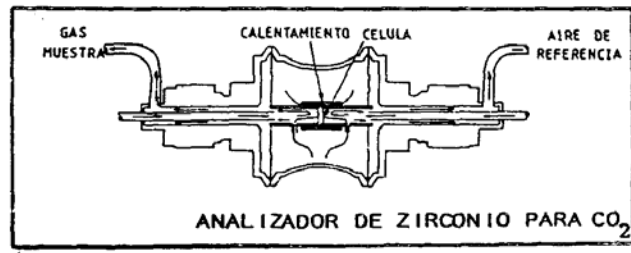
Modernamente se tiende a la determinación del exceso de aire a través del contenido de oxígeno. El % de CO<sub>2</sub> varía para un mismo exceso de aire según el combustible empleado, mientras que el porcentaje de oxígeno, es prácticamente independiente del combustible (ver figuras).

#### Medición del oxígeno

Para medir el O<sub>2</sub> se pueden emplear el llamado sistema paramagnético y la célula de zirconio. El primer método se funda en el efecto de atracción que un campo magnético ejerce sobre las moléculas de oxígeno contenidas en un gas. Las moléculas atraídas pasan a través de una resistencia eléctrica y la refrigeran; el cambio de temperatura en la resistencia modifica el valor de resistividad eléctrica en un valor proporcional al contenido de oxígeno. Este sistema es bastante preciso, salvo cuando los contenidos de oxígeno son muy bajos (en la figura aparece un esquema de este tipo de equipos).

En instalaciones de control automático de combustión es preciso tener una referencia continua del exceso de aire; esto se consigue midiendo el contenido de oxígeno. El sistema paramagnético tiene un tiempo de respuesta largo y poca precisión en niveles de exceso de aire bajos, lo que no lo hace adecuado para estos sistemas.

Si un disco plano de zirconio recubierto con una fina capa de platino, se calienta a 700°C y se coloca de forma que una de sus caras esté en contacto con la atmósfera y la otra con los gases, se crea una diferencia de potencial entre sus caras que es proporcional a la presión parcial del oxígeno en ambas. Cuanto menor sea el nivel de oxígeno en los gases, mayor es la tensión creada. Esta tensión se emplea para controlar el caudal de aire o de combustible y la respuesta a variaciones es muy rápida (en la figura aparece un esquema de este tipo de analizador).



eoi

## 4.6.-MUESTREADORES MANUALES DE PARTICULAS Y GASES EN INMISION

### 4.6.1.-PARTICULAS SEDIMENTABLES

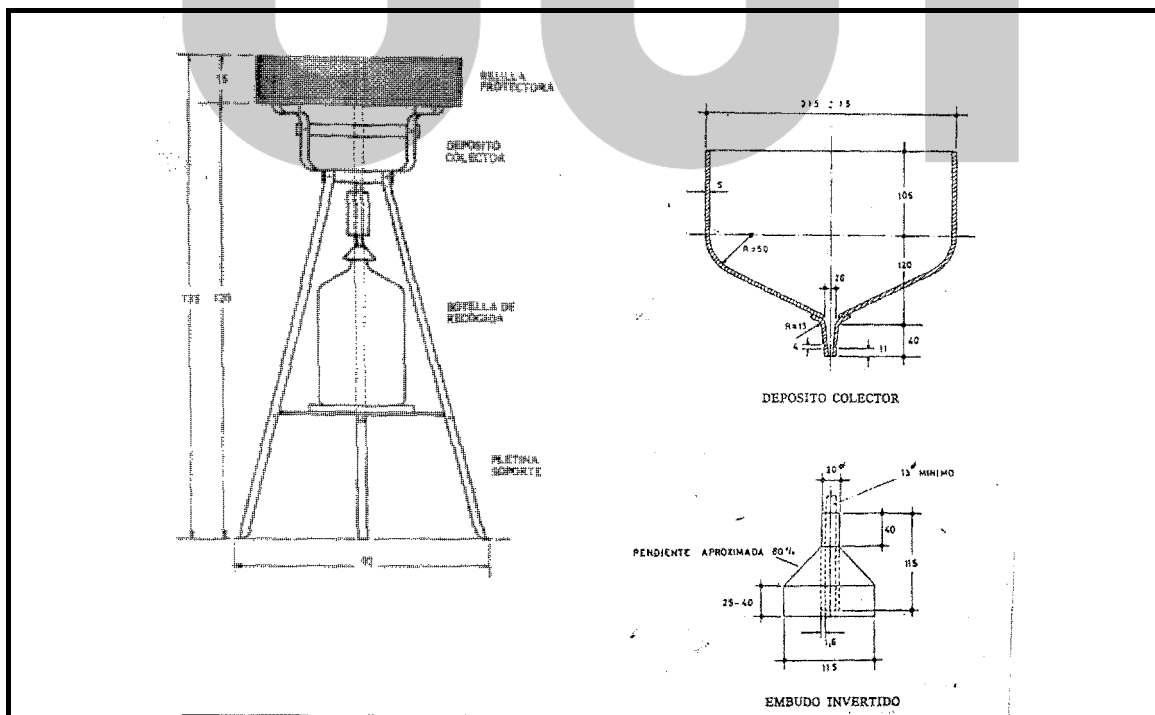
Este tomamuestras Standard Gauge está regulado por la Orden de 10 de Agosto de 1.976, y se utiliza para la determinación de partículas sedimentables que se depositan por gravedad en el interior de un frasco colector.

Los elementos que componen el equipo son:

- Soporte: Es un trípode de 1,35 m de altura.
- Rejilla protectora para evitar la entrada de insectos, hojas, etc, de 25 mm de malla.
- Depósito colector de vidrio o acero inoxidable de 315 mm de diametro Lleva un factor F que multiplicado por el peso total del residuo (mg) da los mg/m2.

$$F = (127,4 \times E4)/02$$

- Frascos colectores: Son de vidrio o plástico de 10 a 20 litros de capacidad.
- El equipo se colocará en un espacio abierto alejado de muros verticales, edificios, árboles. Como criterio de alejamiento se puede considerar la distancia doble de la altura del objeto que interfiere.
- El periodo de recogida de muestras es habitualmente de un mes natural.





eoi

#### 4.6.2.- CAPTADOR DE PEQUEÑO VOLUMEN (SF)

Tomamuestras que se utiliza para la recogida simultánea de partículas en suspensión y gases contenidos en el aire.

Los elementos que componen el equipo son:

- Filtro para la retención de partículas. Pueden ser de papel, fibra de vidrio, etc (según técnica patrón). El filtro se coloca en un soporte especial a la entrada del aire de diámetro normalizado (5 cm de diam. para humos negros).
- Barboteador. Se utiliza un frasco lavador de gases de vidrio incoloro de aproximadamente 150 ml de capacidad.
- Contador de aire aspirado. Se utiliza un contador de tipo seco de 1,5 a 3 l/min + 3 % de capacidad que permita apreciar una lectura de 1 l.
- Bomba aspirante. Del tipo membrana accionada mediante motor eléctrico. Capacidad de aspiración 2 a 4 m<sup>3</sup>/24 h.

Los distintos elementos se conectan mediante tubos de vidrio o material plástico inerte.

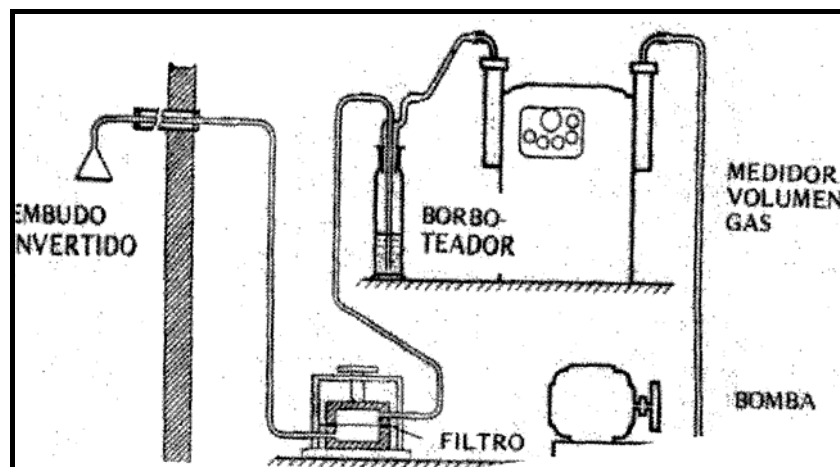
La aspiración se hará a través de un embudo de 3 a 5 cm de diámetro, y una tubería cuya longitud no debe ser superior a 6m ni tendrá curvaturas con radio inferior a 5 cm, con lo que se consigue evitar deposiciones.

La altura de aspiración al suelo debe ser superior a 3 m y la distancia horizontal a cualquier paramento vertical debe ser superior a 0,5 m.

El equipo suele incorporar programador secuencial de muestreo con combinación de saltos de 15 minutos, regulación del caudal de muestreo.

Se presenta en dos versiones: de recogida diaria de las muestras o semanal. En el último caso el equipo dispone de un mecanismo semiautomático que permite el muestreo secuencial en ocho filtros y barboteadores a base de electroválvulas.

El período de muestreo suele ser de 24 horas.





eoi

#### 4.6.3.- CAPTADOR DE ALTO VOLUMEN (CAV)

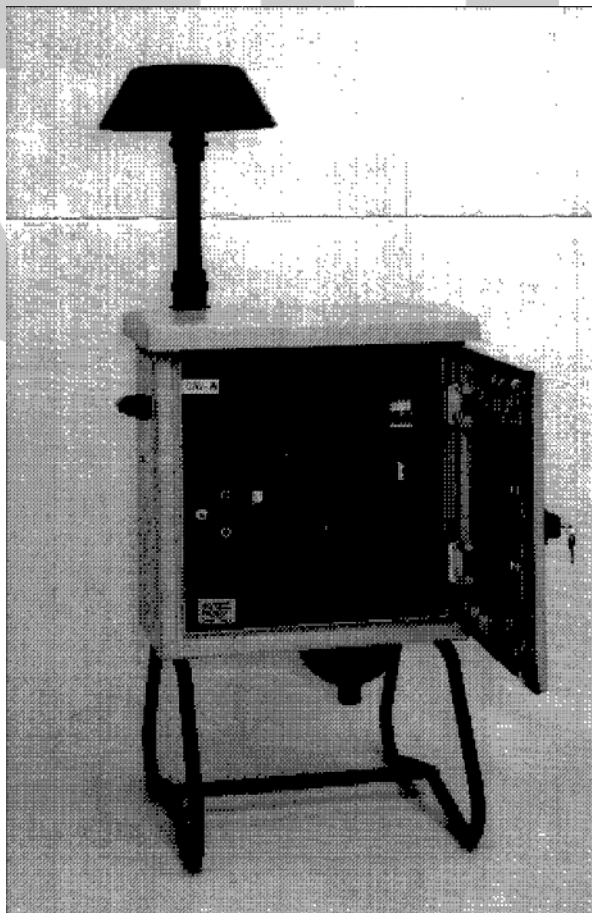
Tomamuestras utilizado para la recogida de partículas en suspensión ( $> 0,1$  micras contenidas en el aire).

Los elementos que componen el equipo son:

- Soporte para el filtro. De forma tronco cónica con una malla metálica en la base mayor sobre la que se deposita el filtro.
- Filtro. De papel, teflón o fibra de vidrio. La superficie filtrante tendrá un diámetro de 120 mm.
- Conjunto de aspiración. Formada por una canalización que comunica la aspiración con un equipo motobomba de vacío a través de un calderín regularizador y un vacuómetro. El caudal de la motobomba estará comprendido entre 40 y 50 m<sup>3</sup>/h.
- Gasómetro contador. Constará de un rotámetro con graduación entre 10 y 60 m<sup>3</sup>/h, un contador en seco de gas de 60 m<sup>3</sup>/h de capacidad con un error de lectura de +3%.

El equipo se ubicará de tal forma que entre el plano del filtro y el del terreno exista una distancia de 2m. En horizontal no debe existir ningún obstáculo en un radio inferior a un metro.

El período de muestreo suele ser de 24 horas.







eoi

#### 4.6.4.- CAPTADOR PARA LA DETERMINACION DE PLOMO

Se pueden utilizar tanto el captador de bajo como el de alto volumen descritos anteriormente, así como un muestreador secuencial de medio volumen.

Se trata de retener la muestra de plomo en un filtro para su posterior tratamiento y análisis en laboratorio mediante absorción atómica.

Las características más importantes de los muestreadores secuenciales de medio volumen son las siguientes:

- NUMEROS DE PORTAFILTROS: 8 + Testigo
- DIAMETROS DE ASPIRACION: 25,4; 50,8; 76,2 mm
- CAUDAL DE ASPIRACION: Regulable entre 7 y 65 m<sup>3</sup>/día
- CONTROL DE OPERACION: Automática, secuencial mediante activación de electroválvulas.
- TEMPORIZADOR: Ajustable; 6, 12, 24 y 48 h.
- ALIMENTACION: 220V 50 Hz. Incluirá batería que dote al equipo de una autonomía de 8 días en los casos de fallo de alimentación eléctrica.

Este tipo de equipos no está regulado en la orden de 10 de agosto de 1.976.

El período de muestreo suele ser de 8 ó 24 horas.

#### 4.6.5.- CAPTADOR DE NO<sub>x</sub>

Equipo tomamuestras utilizado para la recogida de óxidos nitrosos (NO<sub>2</sub>) y óxidos nítrico (NO).

El equipo es similar al captador de pequeño volumen con algunas variaciones.

El aire se aspira con una bomba tal y como se indica en el esquema de la figura. Con el fin de diferenciar las formas menos oxidadas (NO) de las más oxidadas (NO<sub>2</sub> - N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, etc) del nitrógeno, el tomamuestras dispone de dos barboteadores.

El primero retiene el NO<sub>2</sub> existente en el aire. El NO pasa a través del primer barboteador y se oxida a NO<sub>2</sub> mediante una lámpara de ozono interpuesta en el circuito. El exceso de ozono se destruye al pasar la corriente de aire ozonizado a través de lana de plata calentada a 130°C, recogándose el NO transformado en NO<sub>2</sub> en el segundo barboteador.

Transcurrido el tiempo de toma de muestra, se retiran los barboteadores y se analizan en el laboratorio.

Las características del equipo son las siguientes :

- Filtro Whatman nº 1.
- El caudal de aspiración es del orden de unos 35 litros/hora.
- Los barboteadores tienen una capacidad de unos 100 ml.
- La ozonización se logra con una lámpara de ozono.
- Contador de flujo de aire y bomba de aspiración regulable de aproximadamente 35 l/hora.

El tiempo de muestreo suele ser de 24 horas para un flujo de 35 l/h.

## 4.7.-TECNICAS ANALITICAS APLICABLES

### 4.7.1.-DIOXIDO DE AZUFRE (S02)

#### Método de la Thorina

\*Principio del método.- El anhídrido sulfuroso del aire contaminado se absorbe barboteando a través de una solución de peróxido de hidrogeno, previamente acidificado, en donde se oxida y se transforma en ácido sulfúrico. Se añade una cantidad conocida de perclorato bórico para formar sulfato bórico y el exceso de ión bario se determina espectrofotométricamente a una longitud de onda de 520 nm previa reacción con Thorina.

\*Muestreador.- Captador de pequeño volumen.

\*Filtro.- Se utiliza papel Whatman nº 1.

\*Barboteador.- Vidrio de 150 ml de capacidad.

\*Espectrofotómetro.- Debe alcanzar un intervalo de longitudes de onda entre 400 y 700 n.»..

\*Calibración.- La línea de calibración es válida solamente dentro del intervalo de uno a ocho microgramos de anhídrido sulfuroso por mililitro.

\*Interferencias.- En las medidas habituales de inmisión, no es normalmente necesario tener en cuenta la interferencia posible de otros gases, que si podrían producirse en determinadas zonas industrializadas.

\*Cálculos.- La concentración de S02 en el aire expresada en microgramos de anhídrido sulfuroso por metro cúbico, se calcula por la fórmula siguiente:

$$C = \frac{N \times V_m}{V_a}$$

siendo:

N = microgramos de anhídrido sulfuroso por mililitro, deducidos en la curva de calibración.

V<sub>m</sub>=volumen final del líquido de la muestra (en mililitros) si no hubo que concentrar o diluir.

V<sub>a</sub>= volumen del aire medido en el contador, expresado en metros cúbicos y reducido a condiciones normales, como se indica en el método general de toma de muestras.

#### Método de la acidez gaseosa total

\* Principio del método.- El anhídrido sulfuroso del aire contaminado se absorbe barboteando a través de una solución de peróxido de hidrógeno donde, al oxidarse, queda retenido como ácido sulfúrico. Este origina un aumento de acidez que se determina por volumetría, y del valor obtenido se calcula la concentración del anhídrido sulfuroso.

\*Muestreador.- Captador de pequeño volumen.

interior.

\*Barboteadores.- Se utilizan barboteadores de 125 mililitros de capacidad y cinco centímetros de diámetro

\*Filtro.- Como filtro se utiliza papel Whatman nº 1.

\*Indicador.- Utilizar un indicador que vire a pH = 4,5 según el siguiente esquema:

Menor	pH = 4,5	Mayor
Color rosado	Color gris	Color azul

\*Cálculos.- Llamando L a los litros de volumen de la muestra de aire en condiciones normales y M a los mililitros del reactivo (3) gastados, la concentración de la acidez gaseosa total, expresada en anhídrido sulfuroso, viene dada por la fórmula siguiente:

$$\text{Concentración} = \frac{321 \times E3 \times M}{L} \text{ (microgramos/m}^3\text{)}$$

La precisión del método es de + 10 por 100 para concentraciones superiores a 100 microgramos por metro cúbico. A más bajas concentraciones disminuye.

\*Interferencias.- La interferencia más frecuente es la presencia de amoníaco, recomendándose en este caso sustituir este método por el de la Thorina.

También puede resolverse este inconveniente, haciendo una valoración paralela de amoníaco por los métodos descritos (anexo nº 6), siempre que el contenido de amoníaco en la atmósfera no sea superior al de anhídrido sulfuroso, de tal manera que neutralice todo el ácido sulfúrico formado, llegándose a quedar la muestra alcalina frente al indicador (S).

Para hacer la corrección, el contenido de amoníaco, en microgramos por metro cúbico, se multiplica por el factor = 1,88 y el resultado se suma al valor obtenido de anhídrido sulfuroso.

\*Los resultados del método de medición por la "acidez gaseosa total" serán válidos para la Red Nacional, siempre que no existan agentes gaseosos que interfieran, perturben o incidan en el método. Sin embargo, serán aceptables cuando, a pesar de la presencia de tales agentes, la diferencia entre los valores obtenidos por la técnica patrón y por el método de medición, queden comprendidos en el intervalo del 10 por 100, en más o menos, de los correspondientes al primero.

#### 4.7.2.-OXIDOS DE NITRÓGENO (NO, N02)

##### **Método de Griess-Salzman**

\*Principio del método.- Los óxidos de nitrógeno que contaminan el aire se recogen en forma de N02 sobre una disolución de trietanolamina y se valoran por colorimetría por la reacción de Griess-Salzman frente a patrones de nítrico sódico.

\*Muestreador.- El captador de NOx.

\*Barboteadores.- Son frascos lavadores de gases con placa difusora de vidrio de unos 100 ml de capacidad.

\*Espectrofotómetro.- Debe alcanzar un intervalo de longitudes de onda entre 400 y 700 nm

\*Calibración.- Trazar la línea  $a = f(m')$  donde  $m'$  es la masa de iones N02 que confiere a la solución final la absorbencia  $a$ .

Ajustar por el método de los mínimos cuadrados.

Por encima de 60 microg de N02 no se cumple la Ley de Lambertbeer; por tal motivo, cuando se rebasa esta concentración se verifican diluciones hasta alcanzar el intervalo deseado.



\*Cálculo.- En el cálculo se utiliza un factor de corrección de 0,85 de paso microg/N02 (gas) a microg de NOs (ion). El factor 5 representa el factor de dilución de la muestra.

$$\mu\text{g de NO}_2/\text{m}^3 = \frac{\mu\text{gNO}_2(\text{en } 10 \text{ ml}) \times 5}{0,85 \times \text{volumen de aire en m}^3}$$

Los valores de NO y N02 se expresan todos en N02.

\*Interferencias.- La interferencia del S02 se elimina con la adición de acetona al reactivo de diazotación.

- Vapores amoniacales (NH3)

\* Método del Fenolato sódico.

\*Fundamento del método.- Se hace pasar el aire a través de una solución de ácido sulfúrico, donde queda retenido el amoníaco en forma de sulfato amónico. Esta solución se valora por reacción del ion amonio con fenolato sódico e hipoclorito sódico, dando una coloración azul que se mide por colorimetría.

\* Toma de muestra.- Se utiliza el captador de pequeño volumen. El periodo de toma de muestras será de 24 horas.

centímetros.

\*Filtro.- Papel Whatman nº 1

\* Barboteador.- El barboteador tendrá 150 mililitros de capacidad y un diámetro aproximado de cinco

\*Espectrofotómetro.- Se utilizará un espectrofotómetro para medir longitudes de onda de 626 nm (puede sustituirse por un fotocolorímetro de suficiente sensibilidad).

\*Calibración.- Mediante la línea de calibración se determina la cantidad de amoníaco expresado en microgramos por mililitro que contiene la muestra.

\*Interferencias.- Algunos iones metálicos pueden producir interferencias en el método, pero en este caso no hay que tenerlo en cuenta porque quedan retenidas en el filtro.

\*Cálculos.- El contenido en amoníaco, expresado en microgramos por metro cúbico, se calcula mediante la siguiente formula

$$\frac{100 A}{V} = \text{microgramos de amoníaco por metro cúbico de aire}$$

siendo:

A = microgramos de amoníaco por mililitro contenido de la muestra.

V = volumen de aire, expresado en metros cúbicos y reducidos a las condiciones normales

### Método de Nessler.

\*Principio del método.- Se hace pasar el aire a través de una solución de ácido sulfúrico, donde queda retenido el amoníaco en forma de sulfato amónico. Esta solución se valora por colorimetría mediante el reactivo de Nessler.

- \*Toma de muestra.- La toma de muestra se realiza con el captador de pequeño volumen. El período de toma de muestra será de 24 horas.
- \*Filtro.- Como filtro se utilizará papel Whatman nº 1.
- \*Barboteador.- El barboteador tendrá 150 mililitros de capacidad y un diámetro aproximado de 5 centímetros.
- \*Espectrofotómetro.- Se usará un espectrofotómetro para medir longitudes de onda de 410 nm (Puede sustituirse por un fotocolorímetro de suficiente sensibilidad).
- \*Cálculos.- El contenido en amoníaco expresado en microgramos por metro cúbico se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{A}{V} \times \frac{100}{B} = \text{microgramos de amoníaco por metro cúbico.}$$

#### 4.7.3.-PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

- \* Método de muestreo de alto volumen.
  - \*Principio de método.- Las partículas suspendidas en el aire, es decir, aquellas que no se precipitan fácilmente por la acción gravitatoria, se recogen haciendo pasar un volumen conocido de aire a través de un filtro de fibra de vidrio de superficie conocida, que retiene todas las partículas de tamaño mayor de 0,1 micrómetros. La determinación se realiza por diferencia de peso del filtro antes y después de la toma de muestra.
  - \*Aparatos y material.- 1) Un equipo de captación de alto volumen; 2) Una balanza analítica de sensibilidad de décima de miligramo alojada en un recinto acondicionado para mantener temperatura y humedad constante (22°C +2°) y humedad relativa constante y por debajo del 45 por 100; 3) Filtro, de fibra de vidrio de tipo G.F./Whatman o similar.
  - \*Preparación de los filtros.- Deben ser desechados los filtros con imperfecciones visibles por exposición frente a la luz. Deben estar expuestos a las condiciones ambientales del recinto acondicionado en que se encuentra la balanza, por lo menos 24 horas antes de pesarse, comprobando que se mantiene una pesada constante. Se pesan los filtros con aproximación al miligramo, cuidando de no doblar el filtro antes de utilizarse.
  - \*Recogida de la muestra.- El filtro se coloca en su soporte en el aparato de toma de muestra, y se hace pasar el aire. La muestra se realiza durante 24 horas, al cabo de las cuales se cambia el filtro para efectuar su determinación.
  - \*Valoración.- Una vez las muestras en el laboratorio se conservan en el recinto acondicionado durante 24 horas al menos, antes de pesarlas comprobando igualmente que se obtiene una pesada constante.
- Por diferencia entre las dos determinaciones gravimétricas, obtendremos la masa de partículas suspendidas contenidas en el volumen de aire que ha pasado durante las 24 horas. El peso de las partículas recogidas expresado en microgramos, dividido por el volumen en metros cúbicos de aire captado, representa el resultado final en microgramos por metro cúbico.

#### **Método de referencia para el humo normalizado(OCDE).**

\*Por definición, se entiende como humo normalizado las partículas negras, en su mayoría carbonosas, cuyo tamaño es suficientemente pequeño para permanecer suspendidas en el aire. La valoración de las partículas suspendidas, realizada por este método, es en cierto modo empírica y se limita a la medida de lo que queda definido como humo.

\*Fundamento del método.- El aire, aspirado del exterior, se hace pasar a través de un filtro donde se depositan las partículas y dan lugar a una mancha grisácea de intensidad variable. Recogida la muestra, se determina su opacidad con la ayuda de un reflectómetro que la transforma en una medida galvanométrica, proporcional a aquélla.

Mediante una tabla de equivalencias se transforma la lectura reflectométrica en concentración superficial de la mancha del filtro, expresada en microgramos de humo por centímetro cuadrado (ver figura). Este valor se convierte en concentración por volumen de aire, conociendo la superficie de la mancha y el volumen del aire que ha pasado.

\*Toma de muestra.- Se realiza mediante un captador de pequeño volumen.

El portafiltros será de sección circular y su diámetro inferior podrá ser 2,54 centímetros (una pulgada); 5,08 centímetros (dos pulgadas) o 10,16 centímetros (cuatro pulgadas). Como filtro se utiliza papel Whatman n° 1.

El periodo de toma de muestra es de 24 horas.

\*Valoración.- Para la valoración se precisa un reflectómetro Eel.

Para efectuar la lectura reflectométrica:

1° Se coloca un papel de filtro sin usar sobre la placa blanca que acompaña el aparato, ajustando a 100 la lectura del galvanómetro.

2° Se sustituye el filtro blanco por el que tiene la muestra y se anota la lectura correspondiente.

\*Cálculos.- La concentración de partículas suspendidas, expresada en microgramos de humo por metro cúbico de aire, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{S \times A}{V}$$

siendo:

S = concentración superficial de humo, calculada a partir de la tabla adjunta de equivalencias.

A = superficie de la mancha en centímetros cuadrados.

V = volumen de la muestra de aire, en metros cúbicos (reducido a condiciones normales).

#### 4.7.4.-PARTÍCULAS SEDIMENTABLES

\* Método de Standard Gauge

\*Fundamento del método.- El método consiste en recoger y determinar gravimétricamente las partículas existentes en el aire que son depositadas por gravedad o arrastradas por la lluvia.

\*Recogida de la muestras.- Para la recogida de la muestra deben arrastrarse las partículas adheridas en el depósito hacia el frasco colector, mediante una varilla u otro objeto apropiado, auxiliándose por el lavado con agua destilada (aproximadamente 500 mililitros).

A continuación se retira el frasco colector con el líquido y se sustituye por otro.

El frasco con el líquido recogido se traslada al laboratorio.

\*Valoración.- Una vez el frasco en el laboratorio, se deben separar las partículas groseras por una tela metálica y después filtrar. Ambas operaciones pueden simultanearse en una sola,



utilizando un tamiz de 20 mallas y filtrando por un papel de filtro de cenizas conocidas, previamente tarado. Las partículas que existan en el frasco se arrastrarán lavando con agua destilada.

Se homogeneiza el líquido filtrando y se mide el volumen total.

El filtro se seca a 100°C en estufa y se pesa. La diferencia de peso indica el residuo insoluble total. Una parte alícuota del líquido filtrado se evapora a sequedad en baño María en cápsula previamente tarada. El residuo seco a 100°C se pesa y se refiere al volumen total del líquido, con lo que se obtiene el residuo soluble total.

La suma de los dos resultados anteriores representa el residuo total (descontando el peso del sulfato de cobre añadido).

\*Cálculos.- Conocidos el peso del residuo total P, expresado en miligramos, el factor F del embudo colector, el número de días que el aparato ha estado tomando la muestra, se obtiene el valor ponderal de las partículas sedimentables PS, expresados en miligramos por metro cuadrado y día, mediante la siguiente fórmula:

$$PS = \frac{F \times P}{d}$$

#### 4.7.5.-PLOMO

\*Espectrometría de absorción atómica.

\*Si se utiliza un muestreador de pequeño volumen se tiene que utilizar cámara de grafito.

\*El período de muestreo suele ser de 8 o 24 horas.

### **4.8.-TECNICAS INSTRUMENTALES Y ANALITICAS EN CONTINUO**

En este apartado se estudiarán algunos de los principios de medida que utilizan los equipos automáticos más comunes actualmente utilizados para la vigilancia de contaminantes atmosféricos.

#### 4.8.1.-DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)

De los métodos que pueden considerarse para determinar de forma automática el dióxido de azufre presente en el aire ambiente, existen diferentes procedimientos que se pueden clasificar en:

##### **Fotometría de llama**

Su principio de funcionamiento se basa en la detección por un fototubo de la radiación emitida por los compuestos de azufre al ser quemados en una llama rica en hidrógeno. Un filtro óptico, de paso de banda muy estrecho, deja pasar la línea de 394 nm como principal línea de



resonancia de los compuestos de azufre, debidamente focalizada para obtener la mayor sensibilidad. La figura muestra el esquema de funcionamiento de los equipos basados en esta técnica.

### **Colorimetría**

El método colorimétrico consiste en la reacción que produce el  $\text{SO}_2$  frente al yodo en presencia de almidón, que es de color azul más o menos intenso en función de la cantidad de yodo presente en la disolución.

Una vez producida la reacción se mide la variación que experimenta la transmisión de la luz mediante la incorporación a la unidad química de un espectrofotómetro o equipo eléctrico semejante.

### **Culombimetria**

Basados en reacciones inespecíficas, estos métodos son sensibles a interferencias, aunque los nuevos diseños están consiguiendo reducirlas gracias a sistemas de filtros.

### **Infrarrojo no dispersivo (NDIR)**

Un analizador NDIR consiste en una lámpara que emite luz infrarroja, de la cual se selecciona una banda ancha o porción del rayo de luz que no se descompone en sus longitudes de onda individuales, de aquí el término No dispersiva. La banda contiene el pico o máxima absorción del gas que se va a analizar. El rayo de luz pasa a través de dos células: una por donde pasa la muestra de gas a analizar, y una célula de referencia conteniendo nitrógeno seco que no absorbe luz en la región infrarroja. Ver figura.

La diferencia de energía entre la luz emergente de las células de muestra y de referencia, es medida por un detector que la transforma en una señal adecuada.

El analizador se puede calibrar utilizando muestras de gas de concentraciones conocidas.

La célula de referencia tiene como misión evitar errores de cálculo por las variaciones de la energía de la luz emitida por la lámpara.

Así, en el detector se calcula la energía absorbida por la muestra calculando la diferencia de energía entre la luz recibida de esta célula y de la de referencia, teniendo en cuenta que en cada instante las características de su emisión fueron las mismas.

### **Ultravioleta no dispersiva (NDUV)**

El método de ultravioleta no dispersivo utiliza el mismo principio de absorción de la luz que el método NDIR. Sin embargo, en la luz pasa sólo a través de la célula de muestra y a su salida se separa y se mide la pérdida de energía a dos longitudes de onda diferentes en el rango UV. Ver figura.

Una de las longitudes de onda, como en el método NDIR, se elige de forma que tenga la máxima absorción para el gas a medir. La otra longitud de onda, llamada de referencia, no debe ser absorbida por dicho gas.

A este método también se le llama de "absorción diferencial", sin embargo la energía luminosa se mide a dos longitudes de onda diferentes.

### **Fluorescencia en el ultravioleta**

En espectroscopia de fluorescencia la muestra de gas se irradia con luz ultravioleta, que excita las moléculas del gas, obviamente la luz por éstas emitida tiene menor nivel de energía y una longitud de onda mayor que la luz incidente.

En el análisis de S02 por fluorescencia la luz procedente de una lámpara ultravioleta se filtra para conseguir una banda estrecha alrededor de los 210 nm donde la molécula de S02 tiene su máxima absorción. Después de excitada, la molécula de S02 emite luz que se filtra también para seleccionar una banda. Ver figura.



A large, light gray, stylized version of the 'eoi' logo, consisting of the letters 'e', 'o', and 'i' in a bold, rounded font. The 'i' has a solid gray dot above it.

#### 4.8.2.-OXIDOS DE NITRÓGENO (NO - N02)

##### **Infrarrojo no dispersivo (NDIR)**

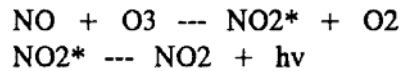
El principio de funcionamiento de los analizadores NDIR ya se ha explicado anteriormente. Para medir NO<sub>x</sub> basta con tomar una banda de frecuencias que contenga la máxima absorción para dichos gases (en realidad para NO).

\*Ultravioleta no dispersivo (NDUV)

El principio de funcionamiento para medir SO<sub>2</sub> también se ha explicado anteriormente. Ahora bien, el análisis de NO<sub>x</sub> requiere la conversión del NO a N02, puesto que el NO no absorbe luz en esta región del espectro.

##### **Quimiluminiscencia**

El método de quimiluminiscencia es el más empleado en la determinación de NO<sub>x</sub>. El principio de medida se basa en la reacción química entre el NO y el ozono:



La radiación emitida está en la región infrarroja del espectro y cubre desde 700 nm a 3000 nm. Los monitores diseñados para medir NO seleccionan una banda estrecha de esta luz emitida mediante el uso de filtros adecuados.

Para medir el N02 con esta técnica, al analizador lleva incorporado un convertidor catalítico que reduce el N02 a NO con la ayuda de calor.

#### 4.8.3.-OTROS CONTAMINANTES GASEOSOS

##### **Monóxido de carbono (CO)**

CO por infrarrojo no dispersivo.

##### **Hidrocarburos (HC)**

HC por ionización de llama para determinación de hidrocarburos totales. A valorar la opción de un cromatógrafo previo para la separación de metano e hidrocarburos no metálicos.

### **Ozono (03)**

03, por absorción en el ultravioleta.

En todos los casos los equipos han de disponer de salidas para registradores (si no forman parte del propio instrumento) y para equipos de adquisición de datos.

#### 4.8.4.-PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

La medida automática y continua del contenido en partículas suspendidas en el aire ambiente tiene bastantes dificultades, por ello no existen muchos instrumentos de medida.

##### **Fotometría de luz dispersa (Nefelómetro)**

Su funcionamiento se basa en la dispersión de un haz luminoso monocromático por partículas suspendidas en una muestra de aire. La medición del coeficiente de dispersión permite calcular la concentración de las partículas en la citada muestra.

La medida está afectada por el color, diámetro y densidad de las partículas.

##### **Radiación Beta**

Es este un método recientemente introducido en analizadores comerciales, basando su funcionamiento en la absorción parcial de la radiación beta producida al atravesar un papel filtro de fibra de vidrio, donde quedan depositadas las partículas en suspensión arrastradas por la muestra de aire ambiente.

Considerando una distribución homogénea de las partículas sobre la superficie del filtro, es posible relacionar la masa depositada con el número de impulsos detectados y contados electrónicamente en el contador Geiger Muller, antes y después de la colección de materia en suspensión.

En esta forma y desde el punto de vista instrumental, la diferencia en tiempo entre la cuenta de los impulsos con y sin materia depositada, medido con gran precisión es directamente proporcional a la masa colectada en el filtro. Conocido el volumen de aire muestreado (aprox. 1 . 3m<sup>3</sup>/h) se obtiene finalmente la concentración de las partículas en microg/m<sup>3</sup>.



### Microbalanza piezometrica

Mide la vibración de un cristal de cuarzo proporcional a las partículas depositadas.

- Parámetros de especificaciones de equipos más comunes
- Intervalo de media (rango)

Concentraciones máxima y mínima que mide el equipo. .Puede haber varios márgenes de medida (escalas).

- Ruido

Desviaciones erráticas de corta duración no debidas a cambio de concentración.

- Nivel de detección

Concentración mínima que genera una señal de valor doble al ruido.

- Interferencia equivalente

Valor de respuesta + ó - causada por sustancias distintas a la medida.

- Derivada de cero

% de variación de la respuesta del equipo a una concentración cero del contaminante medido, tras un período de funcionamiento continuo sin ajuste (24 h).

- Derivada de span

% de variación de la respuesta para medidas sobre un gas de concentración conocida, tras un período determinado de funcionamiento continuo sin ajuste (24 h).

- Tiempo de elevación (caída)

Intervalo entre la respuesta inicial y el 95% de la final una elevación caída brusca de concentración.

- Precisión

Desviación típica de diversas medidas repetidas sobre una misma concentración de contaminante.

- Unidades de media . Concentración en p.p.m. . Para pasar a mg/m<sup>3</sup>N se aplica la fórmula (c.n. = 25°C y 760 en una Hg)

$$C \text{ (mg/m}^3\text{N)} = \frac{P_m}{0,02447} \times \text{p.p.m.}$$

#### **4.9.-OFERTA COMERCIAL DE EQUIPOS DE MEDIDA**

En las páginas siguientes se muestra un directorio de fabricantes de equipos de medida para cada tipo de gas contaminante en función de la técnica empleada ([4]).

A título orientativo los analizadores de gases portátiles con sensores electroquímicos como los indicados anteriormente tienen un costo (1996) que oscila entre 400000 y 1500000 Ptas. según el número de sensores y las prestaciones del equipo.

Los analizadores en continuo de gases tienen precios muy variables en función de los gases que analicen y la técnica utilizada, los precios de los equipos ópticos, por ejemplo oscilan entre 2 y 5 Mptas.

### **5.-CALCULO DE LA ALTURA DE CHIMENEAS**

#### **5.1.-MODELO GENERAL DE DIFUSION DE CONTAMINANTES**

La aplicación de modelos de dispersión atmosférica intenta combinar, de una manera analítica, las características de las emisiones con los fenómenos meteorológicos presentes en la atmósfera, con objeto de determinar las concentraciones y otras propiedades de los contaminantes en puntos definidos alrededor de los focos de emisión.

Los modelos de dispersión atmosférica aparecen como instrumentos de gran utilidad y en muchas ocasiones como prioritarios en los programas de actuación, cuando se quiere abordar entre otros los siguientes problemas:

- a) En las Evaluaciones de Impacto Ambiental originadas por uno o varios focos de contaminación atmosférica de carácter puntual, lineal o superficial existentes o previstos.
- b) Optimización de alturas de chimenea para grandes y medianas instalaciones industriales.
- c) Estudios de situaciones preoperacionales o punto cero; estudios de contaminación de fondo antes del comienzo de una actividad.
- d) Programas de Prevención en instalaciones existentes.

Existen numerosos modelos de difusión de contaminantes tanto para focos puntuales como multiarea.

Los factores que intervienen en la atmósfera para la dispersión de contaminantes, se deducen de los principales procesos físicos que rigen esta dispersión, que, de modo esquemático pueden indicarse como :

-Condiciones físicas (velocidad de salida, temperatura...) del gas en el momento de la emisión : lo que hace que se comporte de una manera distinta a la atmósfera hasta que se produce la homogeneización; lo que supone una modificación de la elevación de la descarga por encima del punto de emisión antes de iniciarse un transporte horizontal..

-Difusión : dependiente de las condiciones meteorológicas. Las variables que influyen en ella son la velocidad del viento y la variación de temperatura. Estas variables condicionan el mezclado

progresivo del efluente con el aire que hace que, aún en ausencia de transporte, el volumen afectado sea cada vez mayor, y las propiedades específicas cada vez más parecidas a las del aire.

-Desaparición y generación de productos : aquellas transformaciones físicas y químicas que hacen variar la concentración de los contaminantes independientemente de los fenómenos meteorológicos. Este proceso es específico de las características del efluente, y de escasa trascendencia en las instalaciones de cogeneración..

-Deposición seca sobre el suelo : movimiento descendente de las partículas debido a la acción de la gravedad que hace que disminuya el contenido de las mismas en el aire, aumentándose, sin embargo, la concentración superficial en el suelo. En los gases este efecto es de menor importancia.

-Deposición húmeda : la lluvia, la nieve etc., producen un efecto de lavado de los efluentes en la atmósfera, disminuyendo su contenido en el aire y aumentando la concentración superficial en el suelo. Este efecto de deposición húmeda, cuando existe, es el que produce reducciones más importantes del contenido del contaminante en la atmósfera.

-Resuspensión : principalmente de partículas, a causa de condiciones meteorológicas particulares o determinadas actividades humanas. Este proceso no es generalmente muy significativo.

El modelo de difusión más generalizado para focos puntuales es el modelo de Pasquill.

La explicación detallada de este modelo excede de los objetivos del presente artículo, por lo que remitimos al lector a la bibliografía específica ([],[ ]).

A modo introductorio mostramos a continuación, de modo esquemático los datos necesarios para su aplicación :

#### A) DATOS REFERIDOS A LA EMISION

Los datos que caracterizan la emisión son muy variables en función del tipo de estudio que se quiere realizar, si bien se pueden dividir en dos grupos: datos característicos de la materia emitida y de cantidad de materia emitida.

Dentro del primer grupo se pueden citar el tamaño medio de las partículas, la altura a la que se realiza, la velocidad y temperatura de salida, la composición química... Dentro del segundo grupo se suele suponer proporcionalidad con respecto a dicho parámetro<sup>8</sup>

#### B) DATOS METEOROLOGICOS

Para el estudio de los fenómenos de dispersión de los contaminantes los datos necesarios dependen del modelo específico a emplear, pero en general, para aquellos que normalmente se aplican son necesarios los siguientes datos:

- Temperatura del aire.
- Vector viento (módulo, dirección y sentido).
- Altura de la capa de mezcla.
- Precipitación.
- Humedad.

---

<sup>8</sup>Los estudios se realizan por unidad de masa, emitida por segundo bastando con multiplicar los resultados de los valores unitarios en los puntos de interés así calculados por el número de unidades emitidas por segundo, para obtener los valores asociados a una emisión determinadas. Este valor, correspondiente a emisión unitaria, se denomina coeficiente de difusión atmosférica  $\langle X/Q \rangle$ .



-Indicador de estabilidad (diferencia de temperatura a distintas cotas o radiación solar y grado de nubosidad).

Los datos meteorológicos, y en particular la matriz de estabilidad, son los que son más difíciles de obtener.

Si la magnitud de la instalación lo exige (centrales térmicas de gran potencia), suelen encargarse estudios meteorológicos a empresas especializadas, los cuales suelen prolongarse 1 año o más.

Par instalaciones de mediana potencia como suelen ser las de cogeneración, suele recurrirse a datos bibliográficos, complementados en su caso con algunas comprobaciones directas.

Las fuentes de información habituales son además del Instituto Meteorológico Nacional, las Universidades y los aeropuertos<sup>9</sup>

### C) DATOS REFERIDOS A LA INMISION.

En algunos casos, se dispone de una red de vigilancia de la contaminación atmosférica, pueden adquirirse información de los niveles de inmisión en diferentes puntos de la zona en estudio. Estos datos, una vez comparados por los suministrados por el modelo empleado, permiten corregir las expresiones para aproximar el modelo lo más posible a la realidad (validación del modelo)

## 5.2.-CALCULO SIMPLIFICADO PARA PEQUEÑAS CHIMENEAS

El método que se muestra a continuación es válido para calcular la altura de chimeneas industriales pequeñas y medianas dentro de los siguientes límites:

- Instalaciones de combustión de potencia global inferior a 100 MWt (86000 térmias/h).
- Chimeneas industriales que emitan menos de 720 Kg./h de cualquier gas, o 100 Kg./h de partículas sólidas.

Los datos necesarios para la aplicación de este modelo :

#### DATOS DE EMISION

- Diámetro de la chimenea.
- Velocidad de emisión.
- Masa de contaminantes emitidos.
- Temperatura de salida de los gases.

#### DATOS METEOROLOGICOS

-Factor de dispersión A

El parámetro A refleja las condiciones climatológicas del lugar y se obtiene multiplicando 70 por un índice climatológico que se calcula en función de las temperaturas.

Este índice climatológico se calcula mediante la expresión:

$$I_c = \left( \frac{\Delta T + 2\delta t}{T_m} \right) + \left( \frac{80}{H} \right)$$

Siendo:

<sup>9</sup>Los aeropuertos son en algunas ocasiones las unicas fuentes de información sobre matrices de estabilidad.

- $\Delta T$  = máxima oscilación de temperatura del lugar, es decir, es la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas (máximas más cálida y mínima más fría).
- $\delta t$  = diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la temperatura media del mes más frío.
- $T_m$  = temperatura media.
- $H$  = humedad relativa media de los meses de diciembre, enero, febrero, marzo tomada de las observaciones fundamentales climatológicas (siete, trece y dieciocho horas).

Los valores de  $T_m$ ,  $\delta t$ ,  $\Delta T$  y  $H$  (valores climatológicos) han de darse sobre períodos de treinta años o como mínimo diez años, preferiblemente.

El valor del parámetro A será, por consiguiente:

$$A = 70 \times I_c$$

### DATOS SOBRE ENTORNO Y CONTAMINACION AMBIENTAL

#### -Contaminación de fondo

El valor de la concentración máxima de contaminantes, a nivel de suelo,  $C_m$ , que no debe sobrepasarse, se obtendrá del siguiente modo:

$$C_m \leq CMA - CF = \text{Valor de referencia} - \text{Valor de la contaminación de fondo}$$

Dichos valores se expresarán como medias de veinticuatro horas en  $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ .

Los valores de referencia, CMA, que pueden considerarse, a falta de reglamentación al respecto son:

#### S02

Promedio de concentración media en un día (veinticuatro horas).  
 $0,4 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N} = 400 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N}$

#### Partículas.

Promedio de concentración media en un día.

$$0,3 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N} = 300 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N}$$

Estos valores se obtendrán independientemente, para los diversos contaminantes existentes, especialmente para el S02 y para las partículas sólidas.

En ausencia de datos de CF, se tomarán los siguientes, para el S02:

- Zona poco contaminada:  $50 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N}$
- Zona medianamente industrializada:  $200 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N}$
- Zona muy industrializada:  $300 \text{ microg}/\text{m}^3\text{N}$

#### -Número de chimeneas situadas en las inmediaciones (n)

El valor H de la altura de la chimenea se halla mediante la fórmula siguiente:

$$H(m) = \sqrt{\frac{AQF}{C_M}} \sqrt[3]{\frac{n}{V\Delta T}}$$

A = parámetro que refleja las condiciones climatológicas del lugar y cuya estimación se explica en el apartado anterior. Es función de la estabilidad térmica vertical media de la temperatura y de la humedad en las capas de la atmósfera.

Q = caudal mínimo de sustancias contaminantes, expresado en Kg./h.

F = coeficiente sin dimensiones relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas en la atmósfera. Para el SO<sub>2</sub> y otros contaminantes gaseosos de igual tipo, cuya velocidad de sedimentación es prácticamente nula, se tomará F=1. En el caso de partículas sólidas o impurezas pesadas, se tomará F=2.

C<sub>M</sub> = concentración máxima de contaminantes, a nivel de suelo, expresada en mg/m<sup>3</sup>N como media de veinticuatro horas.

n = número de chimeneas, incluida la que es objeto de cálculo, situadas a una distancia horizontal inferior a 2 H del emplazamiento de la chimenea de referencia.

V = caudal de gases emitidos, expresado en m<sup>3</sup>/hora.

ΔT = diferencia entre la temperatura de los gases a la salida de la chimenea y la temperatura media anual del aire ambiente en el lugar considerado, expresado en

Si el foco emite varios contaminantes, la altura de la chimenea se calculará para cada uno de ellos adoptándose el valor que resulta mayor.

La altura obtenida sólo será válida si H > H<sub>min</sub> en donde:

$$H_{min} = \frac{13.71VS^{1/4}}{\sqrt{\Delta T}}$$

Siendo:

ΔT = diferencia en C entre la temperatura de salida de humos en la boca de la chimenea y la temperatura media de las máximas del mes más cálido, en el lugar.

V = velocidad de salida de los gases, en la boca de la chimenea, en metros/segundo.

H = altura, en metros, que según la fórmula propuesta resulta para la chimenea.

S = sección interior mínima de la boca de salida de la chimenea, expresada en metros cuadrados.

El caso contrario deberá reunirse al dimensionamiento a partir de modelo de difusión.

### OBSERVACIONES

Las chimeneas se construirán a ser posible de sección circular y de forma que se logre una buena difusión de los gases y que no se sobrepasen en el entorno del foco emisor los niveles de calidad del aire admisible. Se tendrán en cuenta, asimismo, la función de la chimenea como elemento auxiliar de la combustión, los posibles problemas de corrosión y medios para prevenirlos, así como los diversos aspectos de tipo constructivo.

En este sentido deberá de evitarse la ubicación de dispositivos de protección tales como, sombreros chinos o cualquier otro que impida la difusión de gases, utilizándose caso de ser imprescindible, conos invertidos de difusión.



Las grandes instalaciones industriales que emiten gran cantidad de contaminantes a la atmósfera requieren un estudio amplio y profundo de difusión que tengan muy en cuenta las condiciones topográficas y microclimáticas de la zona, que conducen generalmente al establecimiento de chimeneas de gran altura para la necesaria dispersión de los contaminantes. Dichos estudios deberán basarse en la aplicación de modelos matemáticos complejos o investigación sobre maquetas donde se reproduzcan a escala reducida los volúmenes de emisión puntual, así como las condiciones topográficas y meteorológicas de la zona donde vaya a instalarse la industria en cuestión.

eoi

## 6.-TECNICAS DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

### 6.1.-MEJORAS EN LA COMBUSTION EN FOCOS FIJOS

#### 6.1.1.-PARTICULAS

##### 1.-CONTAMINANTES GENERADOS EN EL PROCESO DE COMBUSTION

Desde el punto de vista de su origen los contaminantes atmosféricos pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

- Primarios  
Directamente generados en el proceso, y que en la combustión de hidrocarburos son en mayor o menor grado son :
  - \* Partículas sólidas
  - \* Compuestos de azufre (SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>)
  - \* Monóxido de carbono
  - \* Óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>)
  - \* Otros como hidrocarburos ligeros, y en mucho menor grado : radicales libres, benceno, tolueno, benceno, etileno, propileno y sus derivados.
- Secundarios  
Son los originados en la atmósfera a causa de reacciones entre varios contaminantes primarios generados o no por el proceso de combustión, o bien de uno de ellos con algún componente de la atmósfera

SUBSTANCIA	ORIGEN	EFEECTO MACROECOLOGICO	EFEECTO FLORA Y FAUNA
PARTICULAS	-Defectuosa pulverizacion -Zonas frias	-Visibilidad -Nucleos de condensacion -Daños en materiales	-Flora:bloqueo de estomas -Fauna:mortalidad de macrofagos .edemas pulmonares,bronquitis,etc
SO2	-Azufre en combustible	-Lluvia acida -Daños en materiales	-Igual que particulas -Necrosis foliar
CO	-Combustion incompleta	-Degrada a largo plazo a CO2 -No contribuye directamente al GW	-Desplazamiento de O2 -Necrosis foliar
NO	-Combustion a altas T y P con exceso de aire	-Formacion de NO2 y destruccion de Ozono 1)NO+O3=NO2+O2 2)RO2+NO=NO2+RO 3)H2O+NO=NO2+OH -Formacion de nitratos RO2+OH=Nitratos	-Afecciones pulmonares
NO2	-Degradación NO,y tambien en combustion	-Generación de O3 y NO -Formación de PAN -Formación de acido NO2+OH=HNO3	
CO2	-Combustion	-Lluvia acida -Efecto invernadero	
PB	-En las cenizas	-Contaminacion de suelos y acuiferos	-Neumotóxico -Teratogenico
COVS	-Defectuosa combustión -Zonas frias	-Efecto invernadero -Participan en la formación de O3	-Algunos son conserigenos (benceno,butadieno,etilacrilato) o genotoxicos (formaldehido, acetaldehido, acroleina)

eoi

## 2.-EFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL

Las partículas suponen entre el 10 y el 15% de la masa total de contaminantes de la atmósfera, y de ellas proceden directamente de instalaciones de combustión (calderas, vehículos, incineración de residuos) al menos un 47%.

Las partículas procedentes de las instalaciones de combustión suelen ser cenizas inertes en el caso la combustión de sólidos y residuos combustibles en el caso de líquidos y gaseosos.

No debe sorprendernos el hecho de mencionar a los combustibles gaseosos como potenciales generadores de partículas, (y ello no es debido a las eventuales impurezas contenidas en el combustible) pues como veremos en las páginas siguientes (pág. 32 y ss) el proceso de combustión da lugar, a través de mecanismos no muy conocidos, a la aparición de sustancias de alto peso molecular, independientemente del peso molecular del combustible utilizado.

Así en la combustión del metano en condiciones estequiométricas :  $2\text{CH}_4 + \text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2$ , aproximadamente 1/5 del carbono aparece en forma de hollín, reduciéndose dicha proporción a medida que se incrementa la concentración de oxígeno. Resultados similares se obtienen en la combustión del etano.

En el caso de los combustibles líquidos su origen es más conocido, y está asociado a una insuficiente combustión de las gotitas de combustible.

En general las partículas producidas durante la combustión suelen tener diámetros inferiores a 50  $\mu\text{m}$ , incluye por tanto aerosoles<sup>10</sup> y núcleos de Atkien<sup>11</sup>.

En general las partículas originadas en la combustión de combustibles líquidos suelen tener un diámetro medio inferior a 15  $\mu\text{m}$  en el caso de combustibles sólidos y 0.5  $\mu\text{m}$  en líquidos.

Pero pasemos a continuación a citar los principales efectos que sobre el medio natural (incluyendo en este concepto el derroche de recursos) tienen este tipo de partículas.

### **A.-EFECTOS SOBRE LA FLORA Y LA FAUNA**

Las partículas pueden afectar al crecimiento de las plantas reduciendo la intensidad de la luz y su composición espectral, aunque este efecto solo es significativo en áreas fuertemente contaminadas.

No obstante, se ha observado que el efecto de las partículas se ve potenciado cuando van asociados a otros contaminantes.

Las partículas de pequeño diámetro, y en especial el hollín (diámetros entre 0.1  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$ ), interfieren directamente en el intercambio gaseoso de las plantas por bloqueo de los poros de los estomas.

Los efectos económicos son evidentes, así en el caso de vegetales directamente comercializables, como los productos hortícolas, su valor de venta disminuye considerablemente, o en su caso, suponen un extracoste de preparación para la venta.

10

Un aerosol es una dispersión de partículas sólidas o líquidas de tamaño inferior a 100  $\mu\text{m}$ , que por poseer una velocidad de sedimentación muy baja permanecen suspendidas una gran cantidad de tiempo. Cuando el diámetro se encuentra entre 0.1  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$ , se denomina propiamente partículas en suspensión.

11

Partículas con diámetros comprendidos entre 0.05  $\mu\text{m}$  y 0.1  $\mu\text{m}$ . Son las responsables de la condensación del vapor de agua.



En los invernaderos, el ensuciamiento de los cerramientos, ha provocado incluso el desplazamiento de los mismos a zonas menos contaminadas.

El efecto de las partículas, tanto en las plantas como en los animales, también tiene relación con la composición química de las mismas, los efectos tóxicos de la ingesta de partículas que contienen metales pesados (como Plomo, Zinc, Niquel, Molibdeno, Arsénico y otros), ha quedado plenamente probada.

En los animales afecta a las funciones respiratorias al quedar retenidas en los alveolos pulmonares<sup>12</sup>. La cuantificación del efecto sobre los seres vivos, está en cualquier caso en fase de investigación.

## **B.-EFECTOS SOBRE LOS MATERIALES**

Pueden apuntarse los siguientes :

- Incrementan el coste de limpieza y mantenimiento de los materiales sobre los que se depositan<sup>13</sup>.
- El efecto sobre los exteriores de los edificios y las construcciones monumentales.
- Provocan el ensuciamiento de torres de refrigeración, y sistemas de admisión de aire exterior.
- Abrasión de metales.

---

12

Las partículas pequeñas como las que proceden de las instalaciones de combustión, afectan por tanto en mayor grado que las de mayor tamaño.

13

A menudo son de forma puntiaguda

### C.-EFECTOS SOBRE LOS RECURSOS

Los inquemados sólidos son los principales responsables de la luminosidad de las llamas<sup>14</sup> y por tanto de la energía transmitida por radiación en la cámara de combustión.

Aunque la elevada emisividad de las llamas con fuerte concentración de partículas pudiera aparentemente ser interesante en algunos casos, la aparición de estos debe ser evitada en la medida de lo posible, ya que :

- SE DEPOSITAN EN LAS SUPERFICIES FRIAS DE LAS CAMARAS DE COMBUSTION Y CONDUCTOS DE EVACUACION DISMINUYENDO LA TRANSMISION DE CALOR Y EL TIRO, Y ALTERANDO EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES.

Los efectos de de las capas de hollín en la superficie de los tubos de humos se ha evaluado en :

ESPESOR (mm)	INCR TEMP (°C)	PERDIDA REND.CALD (%)
0.5	28	1.4%
1	61	3
1.5	88	4.5
2	150	6

Pérdida de rendimiento por deposiciones de hollín

- SUPONEN UN DERROCHE DE COMBUSTIBLE.  
Empíricamente se ha establecido la siguiente correlación entre I.B. y % de pérdida sobre combustible.

I.B.	% PERDIDA COMBUSTIBLE
1	0.7
2	1.3
3	2.4
4	3.5
5	4.7
6	6

Su emisión está regulada por la legislación española ([1]) que establece unos valores máximos de I.B.<sup>(15)</sup> de 2 para gasoleos y 3 para fuel-oil, pudiendo incrementarse en una unidad durante el periodo de arranque.



## 1.2.-ORIGEN

Los inquemados sólidos conocidos globalmente como hollín, incluyen, como indicabamos, dos tipos de partículas de origen completamente diferente :

- Cenizas de combustibles sólidos arrastradas fuera del hogar y restos de combustible líquido pulverizado no consumido.
- Hidrocarburos formados durante el proceso de combustión.

El primer tipo de partículas se producen a causa de deficiencias físicas en el proceso de combustión así pulverizaciones deficientes de los combustibles líquidos (tamaño de gota excesivo) mezclado heterogeneo del aire, o índices de exceso de aire próximo o inferiores al estequiométrico, son causas directas de la formación de inquemados en este tipo de combustibles.

El segundo tipo de inquemados se producen a causa de reacciones químicas entre los productos de combustión bajo determinadas condiciones y con cualquier tipo de combustible incluso gaseoso.

En la mayor parte de los procesos de combustión de combustibles sólidos o líquidos las partículas generadas en forma de combustible no consumido, que en adelante denominaremos combustible inquemado se producen en proporciones muy superiores al hollín propiamente dicho.

En cuanto a los mecanismos que favorecen la aparición de hollín diversos estudios realizados parecen sugerir que :

- **EL EFECTO DEL DIAMETRO DE LA GOTA ES MAS ACUSADO QUE LA TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE PARA PRODUCIR LA COMBUSTION COMPLETA.**
- **EL EFECTO SOBRE LA TASA DE EVAPORACION DEL COMBUSTIBLE DEL INCREMENTO EN EL INDICE DE EXCESO DE AIRE ES MENOS ACUSADO QUE LA DISMINUCION EN EL TAMAÑO DE LA GOTA**

Con esto podemos desautorizar una práctica muy extendida entre los mantenedores de calderas cuando aparecen inquemados, que consiste en incrementar el caudal de aire al quemador, ya que como vemos su efecto sobre la tasa de evaporación es mínimo, en tanto su impacto sobre el rendimiento es considerable.

## 1.5.-TECNICAS PREVENTIVAS

Como indicabamos anteriormente, las partículas conocidas globalmente como hollín tienen orígenes distintos.

En tanto lo que denominabamos inquemados sólidos, tienen una causa claramente conocida, esto es la insuficiente evaporación del combustible.

Las partículas de carbono generado, hollín propiamente dicho, tiene un origen menos definido, aunque muy probablemente relacionado con efectos de superficie ([17]), y en particular con el diferencial de temperatura existente.

Las técnicas para prevenir la aparición de este tipo de inquemados pasan por la adición de sustancias inhibitoras y mejorar el dimensionamiento de las cámaras de combustión.

La prevención en el caso de inquemados sólidos procedentes de la combustión de líquidos, consiste en conseguir la evaporación completa de las gotas de combustible. Para ello debe conseguirse que el diámetro de las gotas sea suficientemente pequeño para que se produzca la evaporación completa de las mismas a lo largo de la llama.

Obviamente, cuanto mayor sea el tiempo de residencia de la gota a la temperatura de la llama y menor el diámetro inicial, más reducido será el diámetro final de la misma.

Pero ambos efectos no son comparables pues como se desprende de las ecuaciones :

- Para un diámetro inicial dado el diámetro final varía con la raíz cuadrada del tiempo de residencia (proporcional a la longitud de la llama).
- Para un tiempo de residencia dado el diámetro final es proporcional al diámetro inicial.

Por lo que la actuación sobre el diámetro inicial de la gota será mucho más efectivo que el incremento de la longitud de la llama.

Asimismo se comprueba que también lo es con relación al incremento en la temperatura del combustible<sup>16</sup> o el exceso de aire introducido.

Por tanto y con relación a los combustibles líquidos la medida más importante para prevenir la aparición de inquemados consiste en **CONTROLAR EL TAMAÑO DE LA GOTA DE COMBUSTIBLE PULVERIZADO**.

Pero este no es el único parámetro que condiciona la evaporación y combustión completa del combustible, la **FORMA, TEMPERATURA Y DIMENSIONES DE LA LLAMA**, así como la adecuada **MEZCLA CON EL OXIDANTE**, son también determinantes .

En los apartados siguientes estudiamos los parámetros de que depende el diámetro inicial y las condiciones de evaporación de la gota y las distintas técnicas para controlar la misma.

## A.-MODIFICACIONES EN EL COMBUSTIBLE

Recordemos que las partículas de hollín están compuestas básicamente por carbono, hidrógeno y sustancias minerales no oxidables. El contenido de hidrógeno oscila en torno al 1% en peso, lo que corresponde aproximadamente a la fórmula empírica de  $C_8H$ .

Las características de los mismos varían tanto física como químicamente a lo largo de la llama, así los núcleos iniciales tienen un diámetro típico de 5 nm<sup>(17)</sup>, pero que se incrementa hasta 200 nm o más, principalmente por aglomeración en las últimas etapas de combustión.

El mecanismo de formación todavía no se conoce con precisión, aunque las teorías más recientes apuntan hacia una ruptura de las moléculas de combustible en moléculas de peso inferior, seguidas de una polimerización y deshidrogenación de las mismas.

Por otra parte experimentos controlados realizados en cámaras de combustión esféricas y cilíndricas mostraron una mayor producción de hollín en las primeras, lo que parece indicar que este fenómeno está relacionado con efectos de superficie ([17]).

En las llamas de difusión<sup>(18)</sup>, aunque la relación combustible:oxígeno varía en el plano transversal desde prácticamente aire hasta prácticamente combustible, y cabría esperar una formación constante de inquemados a lo largo de la llama, la formación de los mismos se reduce prácticamente al extremo de la misma.

Los factores determinantes en la formación de hollín en este tipo de llamas parece ser la temperatura y la estructura del combustible, asimismo se ha observado que la formación de carbono se reduce por el contrario, drásticamente cuando la llama es de carácter turbulento.

En las llamas de mezcla, esto es cuando se efectúa un mezclado previo del aire y el combustible<sup>(19)</sup>, la relación combustible:oxígeno es constante en el plano transversal por lo que también cabría esperar la aparición de inquemados cuando el contenido de oxígeno ya es insuficiente incluso para la formación de CO y que coincidiría con el extremo de la llama.

No obstante, en la práctica se puede detectar la presencia de partículas de carbono con relaciones oxígeno:combustible muy superiores a 1. Lo que puede interpretarse como una reacción del tipo:  $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C_{sólido}$ . El equilibrio de esta reacción está favorecido hacia la derecha para bajas temperaturas y hacia la izquierda por encima de los 727 °C (1000 K) ([16] pag 173 y ss).

---

17 1 nm =  $10^{-9}$  m =  $10^{-3}$   $\mu$ m

18 No se efectúa el premezclado del aire con el combustible siendo por tanto variable la relación oxígeno:combustible a lo largo de la llama. Llamas difusivas típicas son las que se producen en los quemadores de gas atmosféricos.

19 Quemadores de gas a presión, y algunos quemadores de combustibles líquidos.

La adición de determinadas sustancias al combustibles parece tener importantes efectos en la producción de carbono fijo, así en la combustión del metano la adición de determinadas sustancias produce los efectos que se citan a continuación ([17]) :

SUBSTANCIA	PRODUCCION DE HOLLIN
NITROGENO	DISMINUYE
HIDROGENO	DISMINUYE
HIDROCARBUROS PESADOS	AUMENTA
PARAFINAS	DISMINUYE
OLEFINAS	DISMINUYE
AROMATICOS	AUMENTA

En general, los aromáticos policíclicos fácilmente que los su vez en mayor medida ([16]).

*Efecto de la adición de determinadas sustancias sobre la formación de carbono fijo*

hidrocarburos forman hollín más alicíclicos, y estos a que los alifáticos

En combustiones de mezclas de hidrocarburos ligeros se ha observado también que los insaturados forman menos hollín que los saturados.

## **B.-SELECCIONAR EL SISTEMA DE PULVERIZACION**

La pulverización del combustible en finas gotas (normalmente entre 10 y 200  $\mu\text{m}$ ) tiene por objeto aumentar la superficie específica del mismo, con lo que mejora su capacidad de evaporación y, por tanto de reacción con el oxidante.

De acuerdo a la técnica empleada para atomizar los quemadores pueden clasificarse en :

### **DE PRESION PURA**

Son los más utilizados en la industria.

Las presiones utilizadas son del orden de 8 a 12  $\text{kg/cm}^2$  para el gasoleo y de 14 a 25  $\text{kg/cm}^2$  para el fuel-oil.

Consisten en una cámara de turbulencia o tobera en donde se comunica al líquido una elevada velocidad, seguida de un inyector o chicle en donde se produce la pulverización.

Existen varios tipos de pulverizadores de este sistema :

- De presión pura sin retorno

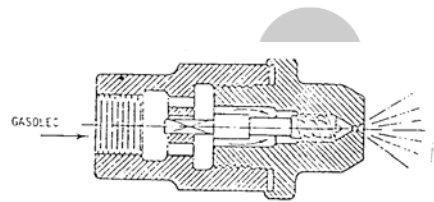
Es el más utilizado en calderas de pequeña capacidad, es un sistema sencillo y poco costoso

No obstante este tipo de pulverizadores presentan las siguientes desventajas con relación al control de recursos :

- El margen de regulación depende en cualquier caso de la presión de la bomba. Dado que esta es en general de velocidad constante, el caudal

trasegado solo puede incrementarse disminuyendo la presión de pulverización<sup>20</sup> lo que tiene una marcada influencia en la elevación del tamaño de gota y por tanto en la producción de inquemados sólidos. La disminución de caudal es menos problemática pues puede efectuarse mediante una válvula de bypass a la aspiración, no afectando a la presión de la bomba.

- Las impurezas sólidas arrastradas con el combustible, no retenidas por el filtro, laminan con el tiempo el orificio del chicle lo que se traduce en una disminución de presión y una elevación de caudal con los efectos apuntados anteriormente.



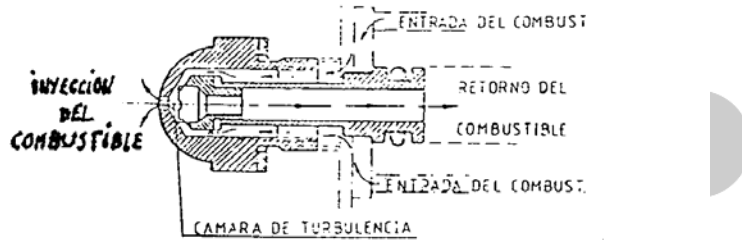
Quegador de presión pura sin retorno

eoioi



- De presión pura con retorno

De construcción similar al anterior, dispone de un conducto de retorno. El caudal inyectado se regula mediante una válvula en el conducto de retorno. Aunque la regulación es más precisa y fácilmente automatizable, sigue presentando las mismas desventajas que los quemadores sin retorno.



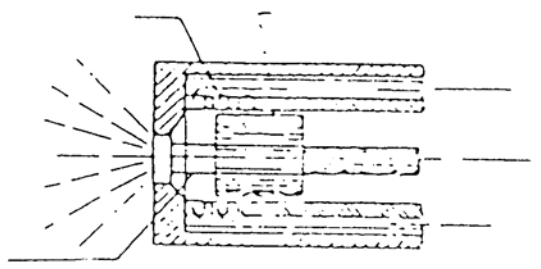
Quemador de presión pura con retorno

- De presión pura con ranuras regulables

Dispone de ranuras tangenciales en la cámara de turbulencia. Cuando se quiere reducir el paso de combustible se reduce la sección de las ranuras mediante el desplazamiento de un pistón de cabeza cónica. El caudal excedente retorna a la aspiración de la bomba mediante un dispositivo de válvula con muelle. Este sistema permite un margen de regulación similar al de presión pura con retorno, con la ventaja de poder mantener con más precisión la presión y velocidad de inyección, con menor consumo de la bomba.

- De pistón

Un pistón desplazable axialmente regula la abertura de un cierto número de orificios tangenciales que comunican con el retorno. Cuando aumenta la presión de alimentación, aumenta la de retorno, lo cual tiende a desplazar el pistón hacia atrás abriendo paso a más orificios tangenciales. Es un sistema intermedio entre los de ranuras regulables y de regulación en retorno.

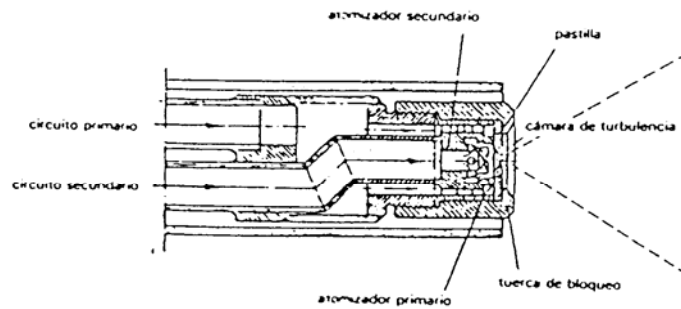


Quemador de pistón

eoi

- De doble circuito de presión

El combustible impulsado por la bomba sigue dos circuitos, uno de ellos impulsa el combustible hacia el centro de la cámara y el otro hacia la superficie del cono. Cada circuito está regulado por una válvula, lo que permite regular el ángulo de chorro y el caudal, de forma independiente.

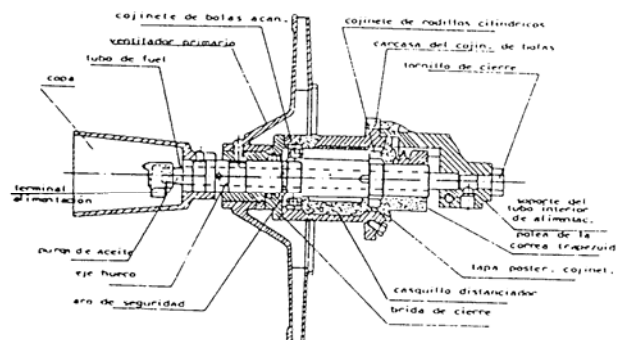


Quemador de doble circuito de presión

ROTATIVOS

Su principio de funcionamiento consiste en hacer girar un pequeño depósito troncoconico a gran velocidad, con lo que el combustible forma una capa delgada junto a la pared y sale proyectado en forma de gotas que son arrastradas y se mezclan con el aire primario introducido por un ventilador.

Este tipo de quemador es especialmente apto para quemar combustibles residuales de baja calidad, pues admiten viscosidades más altas (del orden de 8 a 10 °E), su eficacia es no obstante muy baja.



Quemador rotativo

## QUEMADORES DE PULVERIZACION CON FLUIDO AUXILIAR

Como fluido auxiliar se emplea el vapor, el aire comprimido, y en una técnica relativamente reciente el agua.

En la ATOMIZACION POR VAPOR, se utilizan presiones de combustible entre 4 y 14 kg/cm<sup>2</sup>, con vapor 1 kg/cm<sup>2</sup> mayor.

La introducción de vapor permite a aprovechar la expansión del vapor para pulverizar el combustible a la vez que se calienta el combustible.

Las ventajas de este sistema con relación al aprovechamiento de recursos naturales son :

- Margen de regulación muy elevado (1:6).
- Utiliza recursos energéticos de baja calidad (vapor) en lugar de energía eléctrica (tanto para calentar el combustible como para pulverizarlo).

Asimismo pueden apuntarse las ventajas que presenta en cuanto regulación del ángulo de llama y la alta penetración del chorro en la cámara de combustión.

La ATOMIZACION CON AIRE, permite obtener llamas más calientes y luminosas que las producidas en la atomización con vapor.

Este sistema tiene la desventaja del alto consumo de electricidad (si no se emplea vapor para comprimir el mismo) necesario para comprimir el aire, lo que está en contradicción con el objetivo último de controlar los recursos naturales.

La EMULSION DE COMBUSTIBLE Y AGUA, consiste en formar mediante mezcla a presión de ambos fluidos de pequeñas gotas de agua rodeadas de combustible. El calor reinante en el hogar provoca la brusca vaporización de las mismas, y la consiguiente pulverización del combustible.

El sistema presenta las siguientes ventajas :

- Excelente pulverización del combustible.
- Fuerte reducción de otros contaminantes como el NO<sub>x</sub> y el CO.

Como desventaja puede apuntarse la energía pérdida en evaporar el agua<sup>21</sup>.

Los fabricantes aseguran ahorros de combustible en torno al 5%, y disminución completa de inquemados sólidos.

En las instalaciones en las que se ha instalado este sistema, he podido constatar analíticamente la segunda afirmación.

### **C.-UTILIZAR ADITIVOS**

Los aditivos, mezclados en proporción variable con el combustible, principalmente fuel oil, permiten :

- **Mejorar la atomización**  
Para conseguir una buena atomización, es necesario que la viscosidad del combustible sea correcta y evitar que se formen fangos en el fuel oil los cuales pueden ser debidos a la oxidación o bien a la acción de bacterias.  
Los aditivos utilizados son :

- Antioxidantes.
- Dispersantes para convertir los fangos generados en suspensión estable.

#### **D.-REDUCIR LA TEMPERATURA DE LOS HUMOS**

Los combustibles líquidos utilizados (gasoleo, fuel oil, fuel oil BIA) contienen proporciones importantes de azufre (de \_\_\_ el gasoleo a \_\_\_ el fuel oil n°1) que se convierte en su mayor parte en  $\text{SO}_2$ , y  $\text{SO}_3$ , que puede condensar en forma de rocío ácido a temperaturas suficientemente bajas (155 °C para el gasoleo y a partir de 165 °C para los fuel oil).

Por este motivo se limitan las temperaturas mínimas de los gases de combustión.

Pero el mantenimiento de temperaturas elevadas en los gases de combustión aunque evita el deterioro de los hogares de combustión no mejora los efectos medioambientales (el rocío ácido sigue formándose en la atmósfera) y supone por otra parte un despilfarro de recursos (20 °C de incremento de temperatura suponen por término medio una disminución de un 1% en el rendimiento y un incremento de algo más del 1% en el consumo).

Habitualmente se utilizan aditivos de magnesio (en forma de  $\text{MgO}$ ,  $\text{MgCO}_3$ , o  $\text{MgCO}_3\text{-CaCO}_3$ ) para prevenir estos problemas.



Ademas de los efectos citados los aditivos permiten otras ventajas que se citan brevemente en la tabla siguiente :

PROBLEMAS	CAUSAS	SOLUCION
1. Cegado de tubos, filtros y quemadores.	Fangos ácidos producidos en el fuel-oil.	* Añadir un inhibidor de oxidación y un dispersante de fangos.
2. Corrosión en las líneas de fuel-oil.	Compuestos orgánicos sulfurados ácidos atacan al metal.	* Añadir un inhibidor de corrosión.
3. Combustión incompleta.	Mezcla aire/fuel pobre. Temperatura baja del fuel-oil. Poco aire.	Mejorar mezcladores controlar temperatura y cambiar quemadores. * Utilizar aditivos de Mg o Fe para mejorar combustión.
4. Incrustaciones y corrosión a alta temeperatura.	Na y V.	* Aditivo de Mg. Disminuir el exceso de aire.
5. Baja temperatura del vapor.	Excesiva transferencia del calor a través de la pared del hogar.	* Aditivo de Mg. Recircular gases. Aumentar exceso de aire. Cubrir parte del hogar con refractario.
6. Alta temperatura del vapor.	Hogar sucio.	* Aditivo de Mg. Limpieza del hogar.
7. Corrosión en economizadores y calentadores de aire.	Formación de ácido en los gases.	Reducir exceso aire. * Aditivo de magnesio. Adecuar temperaturas.
8. Emisiones por la chimenea.	Combustión incompleta.	Igual que 7. Añadir aditivos para mejorar la combustión.
9. Pérdidas innecesarias en la chimenea.	Evitar el rocío ácido.	Igual que 7.

### E.-AJUSTAR EL TIPO DE LLAMA A LAS DIMENSIONES DEL HOGAR

Para intensidades de fuego muy altas con relación a la cámara de combustión pueden quedar partículas de carbono impregnando la pared del hogar. Estas partículas, al entrar en contacto con la temperatura más baja de la superficie coquizan, y aunque no queden adheridas sino sean arrastradas por la corriente de gases la temperatura y el tiempo de permanencia pueden no ser suficientes y ser vértidos a la atmosfera.

En resumen, el quemador debe elegirse, teniendo en cuenta :

- \* Forma, dimensiones y temperatura de las paredes del hogar : determinan angulo de pulverización tamaño de gota, caudal de combustible.  
En general para las calderas pirotubulares empleadas en la industria quemando fuel oil se suelen adoptar volumenes de cámara en torno a 2.5 MW/m<sup>3</sup> (2150 th/m<sup>3</sup>).
- \* Funcionamiento continuo o intermitente : este último da lugar a la aparición de una mayor proporción de inquemados solidos.
- \* Tipo de combustible y exceso de aire requerido.

**F.-MEJORAR EL MANTENIMIENTO**

Incluye acciones del tipo :

\* Control de la temperatura del combustible

Los combustibles líquidos pesados, como el fuel oil necesitan un precalentamiento previo a su pulverización, este precalentamiento se efectúa habitualmente en el depósito nodriza del quemador, las variaciones de temperatura en el mismo afectan de modo decisivo en el grado de pulverización, y por tanto en la posibilidad de generar inquemados.

Las temperaturas de precalentamiento dependen del tipo de pulverización utilizada

TIPO DE QUEMADOR	VISCOSIDAD		TEMPERATURA (°C)	
	Grados Engler (°E)	Centistokes (cst)	F.O. n.º 1	F.O. n.º 2
Pulverización mecánica por presión directa	1,5 - 3,0	5,7 - 21,2	125 - 100	130 - 115
Pulverización neumática	3,5 - 5,0	25,6 - 37,4	96 - 81	109 - 95
Pulverización con vapor	4,1 - 5,3	30,0 - 40,0	89 - 81	105 - 97
Pulverización centrífuga en quesadores de copa rotativa	5,0 - 10,0	37,4 - 76,3	88 - 70	115 - 80

Temperaturas de atomización fuel oil

\* Control del índice de exceso de aire

Aunque como indicamos (32), el exceso de aire no influye de forma favorable con relación a su impacto en el rendimiento, en la tasa de evaporación del combustible y en la formación de NOx, el mantenimiento de valores excesivamente próximos o por debajo de los estequiométricos, afecta de forma negativa en dicha evaporación, así como favorece la aparición de otros inquemados como el CO.

En la tabla siguiente se muestran los valores recomendados de exceso de aire para combustible líquidos.

CAPACIDAD CALDERA	TIPO DE CONTROL	% O <sub>2</sub>		% (CO <sub>2</sub> + SO <sub>2</sub> )		% EXCESO AIRE	
		GAS		GAS		GAS	
		FUEL-OIL	NATURAL	FUEL-OIL	NATURAL	FUEL-OIL	NATURAL
0-5.000.000 kcal/h	Mecánico	5,5	4,0	12,0	9,7	35	30
	Mecánico	5,0	3,5	12,5	10,0	30	25
5.000.000-20.000.000 kcal/h	Neumático	4,5	3,0	13,0	10,3	25	20
	Multivariable	2,0	1,5	15,0	11,0	10	7
>20.000.000 kcal/h	Neumático	3,5	2,5	13,5	10,5	20	15
	Multivariable	1,5	1,0	15,5	11,5	5	5

\* Limpieza periodica del hogar, caja de humos y chimenea



### 6.1.2.-ANHIDRIDO SULFUROSO

El anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) se forma por la combustión del azufre presente en el combustible con el oxígeno aportado por el comburente.

Para los combustibles líquidos principalmente los derivados del petróleo las técnicas preventivas pasan por la desulfuración en refinería de los mismos.

La aplicación de este tipo de medidas a los carbones (principalmente lignitos muy abundantes en las cuencas españolas}, no ha dado muy buenos resultados aunque ENDESA ha realizado experiencias en el mismo.

En la actualidad la técnica que parece más prometedora es la combustión del carbón pulverizado en lecho fluido (atmosférico o a presión).

En la página siguiente se muestran las ventajas comparativas del sistema a presión

### 6.1.3.-MONOXIDO DE CARBONO

Para cada tipo de combustible existe una cantidad mínima de oxígeno (llamada estequiométrica) necesaria para la combustión completa del mismo.

El oxígeno o aire estequiométrico, depende exclusivamente de la composición del combustible, esto es de las cantidades de C, H, y O.

Si la combustión fuese ideal la mezcla de la cantidad estequiométrica con el combustible daría lugar a la combustión completa del mismo, es decir a la aparición de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub> como únicos productos de combustión.

En la práctica, sin embargo, se producen combustiones incompletas, es decir aquellas que dan lugar a la aparición de CO y otros inquemados, porque no se puede asegurar que cada molécula de combustible tenga a su alrededor las moléculas mínimas de O<sub>2</sub>.

Para evitar esto, se introduce una cantidad de aire superior a la necesaria o estequiométrica. A la relación entre la cantidad de aire introducida y la estequiométrica se la denomina Índice de exceso de aire ( $n = \text{Aire Real} / \text{Aire estequiométrico}$ ).

La primera causa de aparición de CO y otros inquemados es la introducción de cantidades de aire inferiores al estequiométrico ( $n < 1$ ), pero no es la única

Es posible que aunque se introduzcan cantidades de aire iguales o superiores al estequiométrico, la mezcla entre estas sea deficiente, y aparezcan cantidades significativas de CO.



El índice de exceso de aire se puede determinar analizando la cantidad de oxígeno y CO<sub>2</sub> residuales en los gases de combustión, haciendo uso a continuación del diagrama de Ostwald (típico para cada tipo de combustible).

Los índices de exceso de aire habituales oscilan entre el 5% para 108 gases combustibles hasta el 50% o más para los combustibles líquidos pesados.

En resumen, las emisiones de CO y otros inquemados se pueden reducir significativamente aumentando el exceso de aire si este es bajo, o, estudiando la mezcla aire - combustible (inestabilidades de llama)

El aumento del Índice de exceso de aire no debe ser muy elevado por dos motivos:

Se puede incrementar la formación de óxidos de nitrógeno, como se verá en el punto siguiente.

Al aumentar la cantidad de oxígeno se aumenta la de nitrógeno que, aunque es inerte, se emite a una elevada temperatura dando lugar a bajos rendimientos de combustión y por tanto a incrementos de consumo de combustible, con sus consiguientes emisiones a la atmósfera

#### 6.1.4.-OXIDOS DE NITROGENO

Los óxidos de nitrógeno: dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), óxido nítrico (NO) y nitroso (N<sub>2</sub>O) identificados globalmente como NO<sub>x</sub> se forman en las combustiones a alta temperatura y/o presión con exceso de aire.

En las combustiones se forma principalmente óxido nítrico, aunque se tienen pequeñas producciones de NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O.

Es por ello que las principales fuentes de ellos son los motores de combustión interna en donde se dan en mayor grado las condiciones indicadas.

Las técnicas preventivas se centran en:

- Reducir la presión y/o la temperatura, recirculando gases por ejemplo.
- Mantener uniforme el Índice de exceso de aire a lo largo de la llama

En la página siguiente se muestra un esquema de un quemador de baja producción de NO<sub>x</sub>

## **7.-TECNICAS DE CORRECCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA**

### **7.1.-SEPARACION DE PARTICULAS**

#### 7.1.1.-SEPARADORES PREVIOS

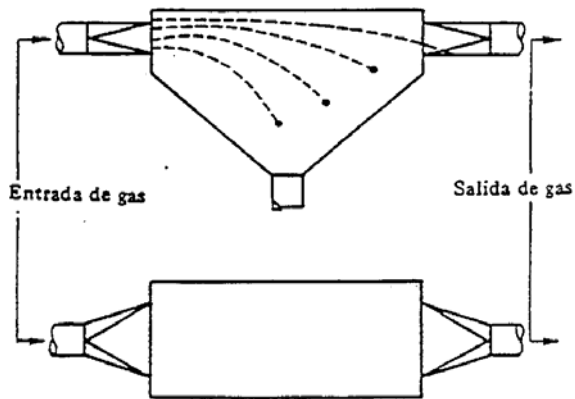
Consideramos como separadores previos, todos aquellos equipos previstos para la separación de partículas de gran diámetro ( $>5 \mu\text{m}$  como mínimo), para los que las instalaciones de cogeneración, incluso basadas en combustibles sólidos, sólo puede hacer uso como primera etapa.

Entre estos equipos pueden citarse :

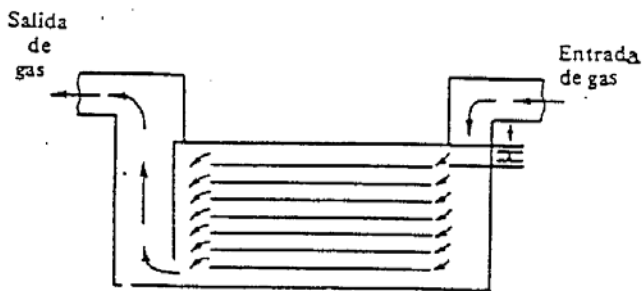
#### **■ Separadores por gravedad:**

Son cámaras de sedimentación suficientemente grandes en las que la velocidad de la corriente gaseosa se reduce para que las partículas que están en suspensión tengan tiempo suficiente para depositarse.

Exige grandes longitudes para poder separar partículas pequeñas, por ello el sistema sólo se emplea bien como etapa previa a otro sistema o bien para la separación de partículas de gran tamaño (diámetros superiores a 50 micras).



Separador por gravedad

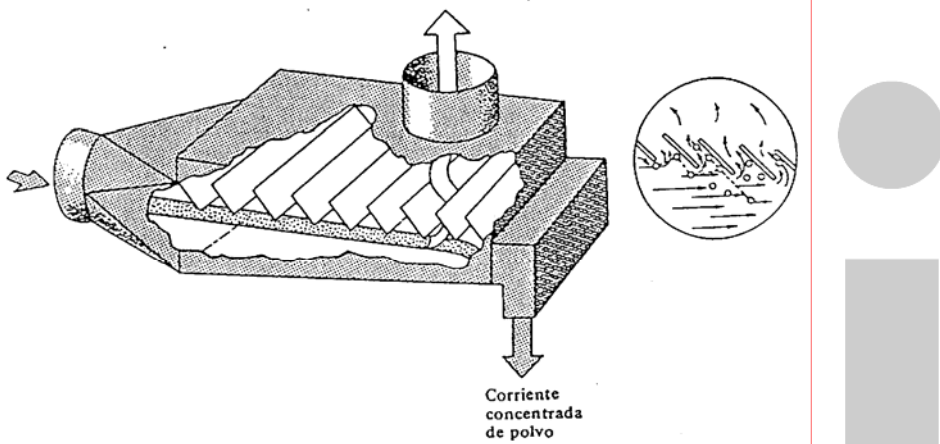


Camara de Howard

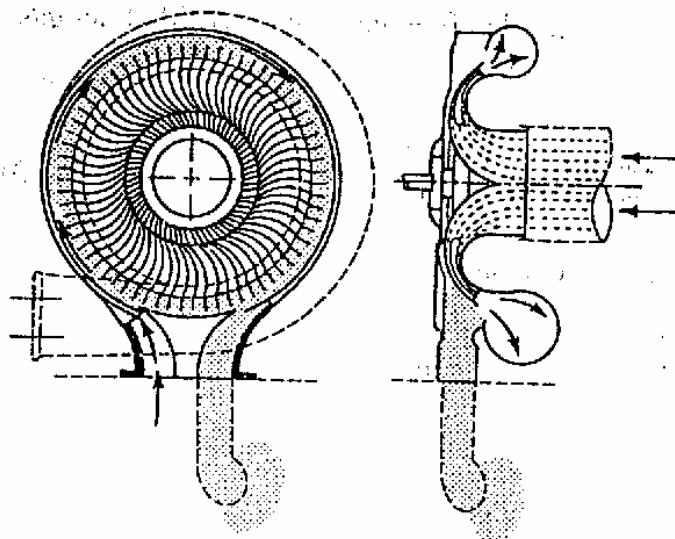
■ Separadores inerciales :

Estos aparatos funcionan imprimiendo un cambio brusco a la dirección de la corriente gaseosa lo que permite la separación de las partículas debido, principalmente, a su inercia.

El empleo de estos sistemas se limita a la captación de partículas de diámetro superior a 20 micras.



CAMARA DE PERSIANA



Dibujo de un precipitador dinámico.



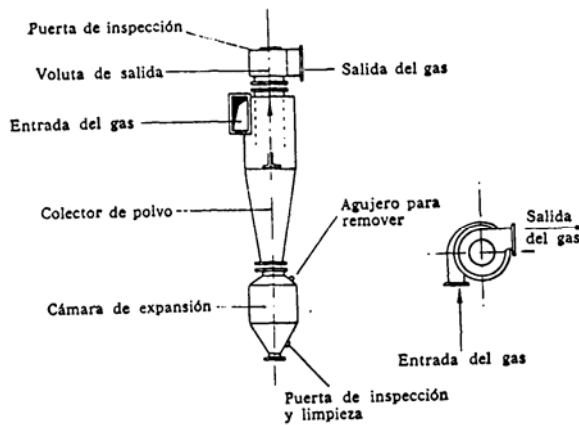
eoi

■ **Ciclones:**

Están formados básicamente por un recipiente cilíndrico vertical donde se introduce (tangencial o axialmente) el gas contaminado, al cual se le imprime una rotación en su recorrido descendente con lo que las partículas por efecto de la fuerza centrífuga se acumulan en la zona perimetral.

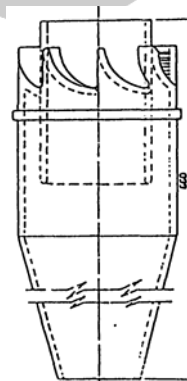
El gas depurado, una vez alcanzado el fondo del ciclón sale por un conducto situado en el eje.

Hay dos tipos de soluciones constructivas de involuta (los más habituales) y los de paletas axiales.



Ciclón de involuta

Los de paletas axiales (utilizados en las combinaciones multiciclónicas) tienen la desventaja la posible obstrucción de los conductos y la erosión de las paletas, pero en cambio son menos costosos que los de involuta.



Ciclón de paletas axiales

Los ciclones se dividen en dos grupos: normales y de alta eficacia (menores de 25 cm. de diámetro).

El límite mínimo de aplicación está en cualquier caso para partículas de 5 a 10 micras de diámetro.



eoi

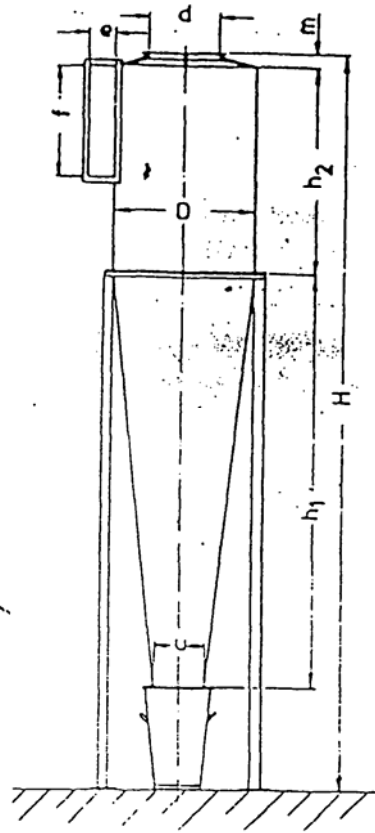


En la tabla siguiente se muestra una comparación del rendimiento entre ambos tipos de ciclones para distintos diámetros de partícula :

Diámetro de la partícula (micras)	Eficacia en peso (% retención)	
	Normales	Alta eficacia
Hasta 5	Hasta 50	50-80
5-20	50-80	80-95
15-40	80-85	95-99
>40	95-99	95-99

La eficacia de captación de los ciclones depende de los siguientes factores :

AUMENTA	DISMINUYE
Concentración de partículas a la entrada Velocidad de entrada Altura del ciclón Diámetro y densidad de la partícula Relación Diámetro exterior/Diámetro salida	Viscosidad y temperatura del gas Diámetro del ciclón



TIPO CICLON :

045/ 35	050/ 40	056/ 45	063/ 50	071/ 56	080/ 63
---------	---------	---------	---------	---------	---------

PARA DISTINTAS  
PERDIDAS DE PRESION

- $\Delta p = 500$  K/ε2
- $\Delta p = 630$  K/ε2
- $\Delta p = 800$  K/ε2
- $\Delta p = 1000$  K/ε2
- $\Delta p = 1250$  K/ε2
- $\Delta p = 1600$  K/ε2

m <sup>3</sup> /h					
2200	2300	3600	4500	5600	7100
2500	3200	4000	5000	6300	8000
2800	3600	4500	5600	7100	9000
3200	4000	5000	6300	8000	10000
3600	4500	5600	7100	9000	11200
4000	5000	63000	8000	10000	12500

MEDIDAS

D	710	800	900	1000	1120	1250
d	355	400	450	500	560	630
a	200	250	355	355	355	355
e	125	160	160	120	200	240
f	630	630	710	800	850	950
h1	2000	2400	2600	3000	3300	3700
h2	1200	1200	1500	1500	1800	2000
g	3275	3680	4185	4555	5210	5855
h	2100	2500	2700	3100	3300	3700
n		80	85	95	110	165
k	225	250	300	300	350	400
L	500	500	600	800	800	900

Analíticamente el rendimiento de un ciclón se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión teórica([7]):

$$\eta = \left[ \frac{\pi N_e \rho_p d_p^2 Q}{9 \mu W^2 H} \right]$$

La expresión anterior presenta la desventaja de que a partir de un determinado diámetro de partícula la eficiencia es siempre 100%, por ello se recurre, a menudo a una fórmula empírica mucho más útil (Lapple [7]), en la que se deduce el tamaño de corte esto es el diámetro de la partícula para el cual la eficiencia colectora es del 50%:

$$dp,50 = \left[ \frac{9 \mu W^2 H}{2 \pi N_e \rho_p Q} \right]^{1/2}$$

En donde :

dp,50 : tamaño de corte del ciclón

$\mu$  : Viscosidad del gas a la temperatura de entrada

W : Ancho de entrada del gas en el ciclón

H : Altura de la entrada del gas en el ciclón

$N_e$  : Número de revoluciones que recorre antes de entrar en el vórtice interno

Está dado con suficiente aproximación por :

$$N_e = \frac{1}{H} \left[ L1 + \left( \frac{L2}{2} \right) \right]$$

En donde L1 es la altura del cilindro superior principal y L2 es la altura del cono inferior.

$\rho_p$  : Densidad de la partícula.

Q : tasa de flujo volumétrico



Por otra parte la pérdida de carga del gas dentro del ciclón, se obtiene con la siguiente expresión <sup>22</sup>([7]):

$$\Delta P = \frac{780801 K Q^2 P^2}{T^2}$$

Siendo :

$\Delta P$  : Pérdida de presión en mmca

K : Constante función del diámetro del ciclón

DIAMETRO (CM)	K
51	0.0001
41	0.001
21	0.01
11	0.1

P : Presión del gas en atm

T : Temperatura del gas en ° Rankine

Como puede observarse tanto el rendimiento como la pérdida de presión están ligados a la velocidad del gas.

Como ejemplo de aplicación de las expresiones anteriores se muestran los resultados de un ciclón tipo, así como las relaciones dimensionales habituales en los ciclones :

Caudal de gases	26 m <sup>3</sup> /min
	0,4 m <sup>3</sup> /s
Velocidad del gas a la entrada	15 m/s
Alto(H)	24,0 cm
Ancho (W=H/2)	12,0 cm
Diámetro exterior(típico Do=1 a 2 H)	32,0 cm
Longitud (L1=2Do)	64 cm
Relación L2/L1	1
Longitud cono (L2=L1)	64 cm
Diam. Cilindro salida (De=Do/2)	16 cm
Diam salida de polvo (Dd=Do/4)	8 cm
Densidad de la partícula	1,7 g/cm <sup>3</sup>
Giros efectivos	4,0 Ud
Temperatura del gas	350 K
Viscosidad del gas	0,0748 kg./m-h
	0,000207 g/cm-s
Tamaño de corte	5,92 micras
Presión	1 atm
Temperatura	350 K
	77 C

<sup>22</sup> Válida para ciclones convencionales. Los de alta eficiencia tienen pérdidas de carga mayores

K	0,01
Perdida de carga	13,2 mmcda

Se sugiere al lector que evalúe el resultado si la temperatura fuese de 450 K<sup>23</sup>

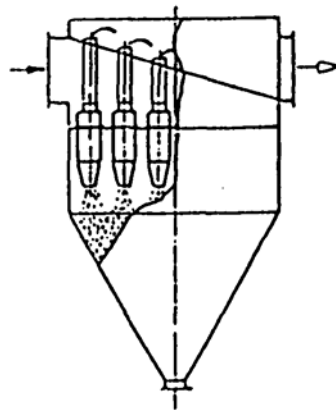
Para los ciclones simples la caída de presión varía desde 13 mmcda a 51 mmcda, y para los de alta eficacia experimentan pérdidas de 51 a 130 mmcda.

En la figura que se adjunta se muestra una gama comercial de ciclones dentro del rango de los que podrían emplearse en una planta de cogeneración.

Los ciclones son dispositivos útiles y baratos que se construyen en una amplia variedad de materiales según el tipo de aplicación.

No llevan partes móviles por lo que su mantenimiento es escaso y generan una pérdida de carga moderada.

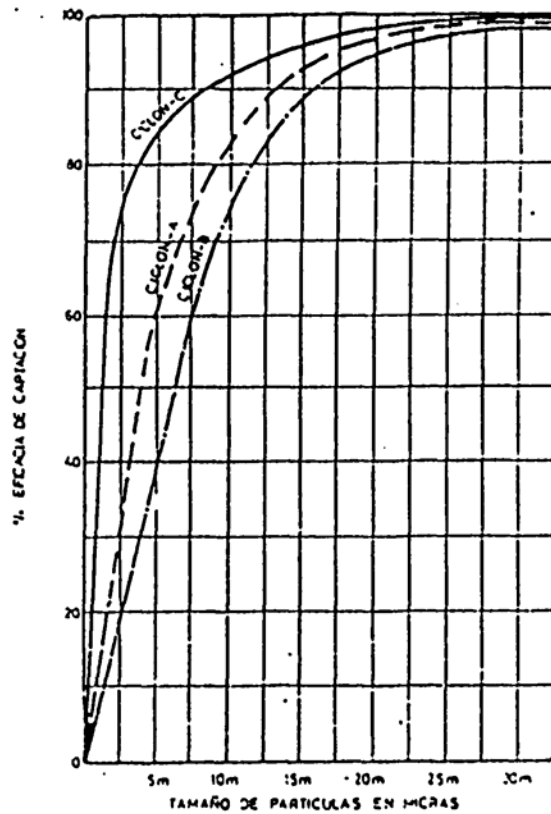
Los ciclones suelen disponerse acoplados en serie o en paralelo.



DISPOSICIÓN MULTICICLON

<sup>23</sup> Para esa temperatura la viscosidad del aire es de 0.09 kg/m-h. El resultado es de 6.49 micras.

La disposición en serie permite aumentar la eficacia colectora global, en tanto la disposición en paralelo permite aumentar el volumen de gases tratados para una misma eficacia colectora.



Los costos de compra e instalación de estos ciclones, son muy variables pues depende del material con el que estén contruidos <sup>24</sup>

Se emplean en hornos de cemento, siderurgia, fundiciones, industria química y en la generación de energía eléctrica como separadores previos cuando se utilizan combustibles sólidos.

<sup>24</sup> Para unidades hasta 3500 m<sup>3</sup>/min oscila en torno ([7]) a 800 - 6000 Ptas/m<sup>3</sup>/min, y para unidades de inferior tamaño incluso superior

### 7.1.2.-FILTROS DE MANGAS

El principio de funcionamiento del filtrado es hacer pasar la corriente de gases a través de un medio poroso donde queda atrapado el polvo.

El mecanismo de retención principal, en contra de lo que pudiera parecer no es la intercepción directa<sup>25</sup> sino el choque y difusión con el material filtrante y las propias partículas en suspensión retenidas en forma de torta.

Los filtros más utilizados son los de mangas<sup>26</sup> ya que pueden tratar grandes volúmenes de gases con altas concentraciones de polvo.

Su eficacia varía con el tiempo y suelen alcanzar valores del 99 por 100, independientemente de las características del gas y el tamaño de partícula, haciendo posible la separación de partículas incluso de  $0.01\mu\text{m}$  de diámetro.

El parámetro de diseño más importante de los filtros de mangas es la **relación de filtración** que no es más que la relación de volumen de gas a superficie filtrante, y se mide generalmente en m/s o m/min.

Cuanto más elevada es la relación de filtración menor es la superficie requerida y por tanto menor la inversión necesaria.

La relación de filtración depende principalmente del tipo de partícula a retener y del tipo de limpieza efectuado.

Se hace notar al lector, que este parámetro es exclusivamente volumétrico, esto es, independiente de la concentración de partículas, concentración que sólo afectará a la frecuencia de la limpieza como se indica a continuación.

---

<sup>25</sup> Solo es apreciable para partículas mayores de  $1\mu\text{m}$

<sup>26</sup> Los elementos filtrantes tienen forma tubular de ahí el nombre.



TIPOS DE POLVOS O HUMOS	TEJIDOS DE HILOS DE MULTIFILAMENTOS CONTINUOS O COMBINACION			TEJIDOS DE HILOS DE FIBRAS CORTADAS			FILTROS PUNZONADOS			
	Secudida o vibración	Contra Corriente sin vibración	Contra Corriente con vibración	Secudida o vibración	Contra Corriente sin vibración	Contra Corriente con vibración	Secudida o vibración	Contra Corriente sin vibración	Contra Corriente con vibración	Aire Comprimido
FERTILIZANTES: (secaderos, enfriadores)	0,55	0,55	0,6	0,65	0,65	0,75	0,75	0,85	0,95	1,65
GRAFITO:	0,55	0,55	0,6	0,65	0,65	0,75	0,75	0,85	0,95	1,5
GRANITO:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	1,8
HARINA:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	2,2
HIERRO (Mineral):	0,55	0,55	0,6	0,65	0,65	0,75	0,75	0,85	0,95	1,65
HUMOS DE COCCION:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	2,2
JABON:	0,6	0,6	0,7	0,75	0,75	0,85	0,9	0,95	1,1	1,8
LIJADORAS:	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,35	1,4	1,55	2,7
ADERA:	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,45	1,55	1,7	2,95
MANGANESO:	0,6	0,6	0,7	0,75	0,75	0,85	0,9	0,95	1,1	1,9
MARMOL:	0,8	0,8	0,9	0,95	0,95	1,1	1,15	1,1	1,4	2,45
MICA:	0,6	0,6	0,7	0,75	0,75	0,85	0,9	0,85	1,1	1,9
MUELAS ABRASIVAS:	0,85	0,85	0,95	1	1	1,15	1,2	1,3	1,5	1,5
NEGRO DE HUMO:	0,55	0,55 0,25 glass	0,6	0,65	0,65 0,3 glass	0,75	0,75	0,85 0,4 glass	0,95	1,65
OXIDO DE ALUMINIO:	0,55	0,55	0,6	0,65	0,65	0,75	0,75	0,85	0,95	1,65
OXIDO DE HIERRO:	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,85	0,9	1,05	1,7
OXIDO DE PLOMO:	0,55	0,55	0,65	0,65	0,65	0,75	0,75	0,85	0,95	1,5
PAPEL:	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,45	1,55	1,7	2,95
PEDERNAL:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	2,2
PEL:	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,45	1,55	1,7	2,95
PINTURAS PIGMENTOS:	0,55	0,55	0,6	0,65	0,65	0,75	0,75	0,85	0,95	1,65
PIZARRA:	0,75	0,75	0,85	0,9	0,9	1	1,1	1,15	1,3	2,25
PLASTICOS:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	2,2
ROCA:	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,35	1,4	1,55	2,7
SILICIA:	0,75	0,75	0,85	0,9	0,9	1	1,1	1,15	1,3	1,8
TABACO:	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,45	1,55	1,7	2,95
TALCO:	0,6	0,6	0,7	0,75	0,75	0,85	0,9	0,95	1,1	1,5
VIDRIO:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	2,2
YESO:	0,7	0,7	0,8	0,85	0,85	0,95	1,0	1,1	1,25	2,2

Otros parámetros de operación muy utilizados son :

- **Carga superficial (M) :** peso de torta por unidad de superficie, que es lógicamente variable con el tiempo. Suele medirse en g/m<sup>2</sup>
- **Arrastre del filtro (S) :** relación entre la caída de presión y la velocidad del gas. Se

mide generalmente en N.min/m<sup>3</sup> ( $\frac{N/m^2}{m/min}$ ).

Ambos parámetros están relacionados por la siguiente expresión :  $S = R \cdot xM$

En donde R es un parámetro de resistencia de la capa de polvo que a su vez depende de la viscosidad del gas, de la densidad de la partícula, y de un coeficiente de permeabilidad de la partícula.





El valor de R característico de cada flujo (suele determinarse experimentalmente) permanece prácticamente constante a lo largo de cada ciclo de trabajo (salvo después de una limpieza), por lo que la relación entre S y M es proporcional.

eoi

Después de un cierto tiempo de utilización, la capa de polvo depositado sobre el material filtrante se va haciendo mayor con lo que se incrementa la eficacia de retención pero también aumentando la resistencia al flujo y por tanto la pérdida de carga de la corriente gaseosa.

Este incremento de la pérdida de carga obliga a disponer de mecanismos automáticos para la limpieza periódica del filtro, entre los que cabe citar :

- **SACUDIMIENTO MECANICO**

En este tipo de limpieza (actualmente poco usado) las partículas se recogen en el interior de la manga, es el menos costoso, pero tiene como desventaja la limitación en la velocidad de filtración ( 0.6 a 1 m/min), lo que eleva la superficie de mangas requerida.

- **FLUJO INVERTIDO DE AIRE**

En este sistema las partículas también se recogen en el interior de las mangas pero en este caso se corta el suministro de aire contaminado al compartimento en el que se va a efectuar la limpieza, y se suministra aire fresco en sentido contrario.

Es más eficaz que el sacudimiento mecánico, pero la economía de operación exige la utilización de mangas largas (6 a 7 metros), como contrapartida las velocidades de filtración son más elevadas que en el caso anterior (2 a 4 m/min).

- ***CHOQUES DE IMPULSO (JET PULSE)***

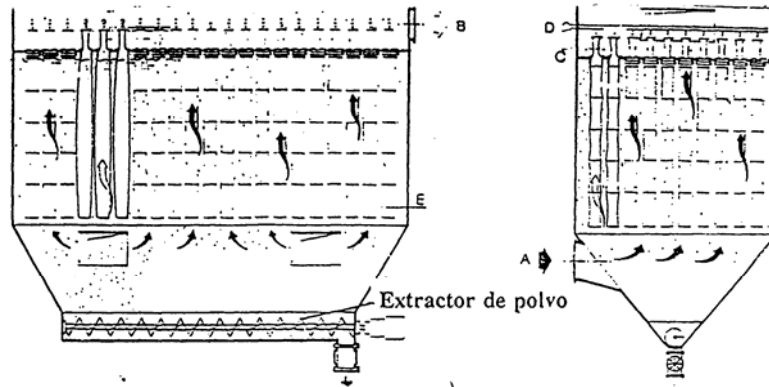
Las partículas se recogen en la parte exterior y no interior de las mangas. En el momento adecuado, se dirige un corto impulso de aire comprimido a través de un venturi situado en la parte superior de la manga.

Como el tiempo de limpieza es muy corto, y sólo una fracción de las mangas se limpia cada vez, se mantiene a diferencia de los anteriores un flujo continuo a través del filtro.

Las velocidades típicas de filtración son de 2 a 5 m/min, la longitud de las mangas está limitada a unos 5 m. ya que para mayores longitudes la limpieza puede ser deficiente.

Es el sistema con mayor tendencia de uso en la actualidad.

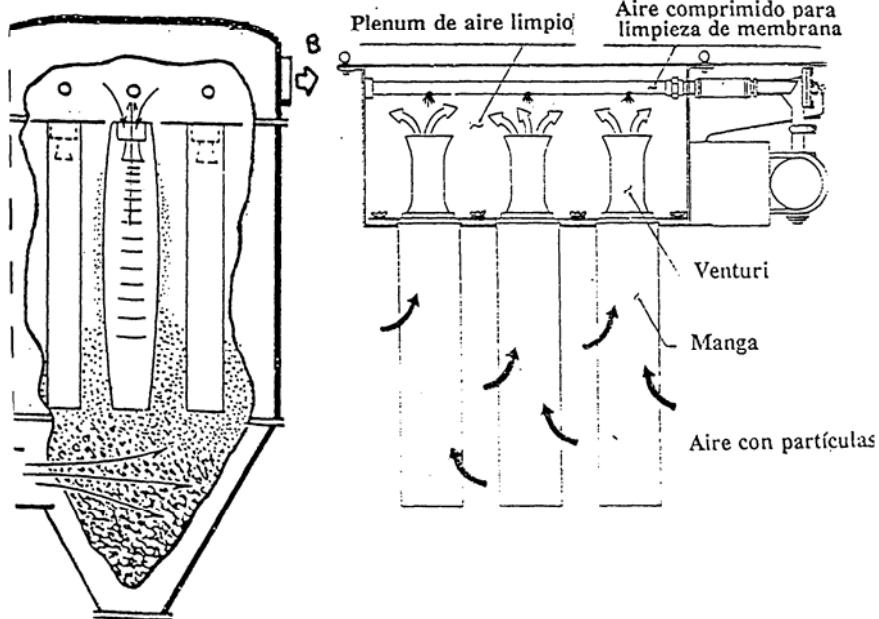




- A - Entrada aire sucio
- B - Salida aire limpio
- C - Placa portamangas
- D - Válvula de membrana
- E - Manga

FUNCIONAMIENTO NORMAL

LIMPIEZA DE MANGAS



La regulación de los ciclos de limpieza puede hacerse de modo temporizado, o bien mediante sensores de presión diferencial.



Las mangas suelen ser de tela o fieltro, aunque también existen de fibra metálica o cerámica (utilizados para aplicaciones a altas presiones y temperaturas) y de papel<sup>27</sup>.

Los tejidos de fibra de vidrio son muy populares por cuanto son relativamente baratos, y pueden emplearse a temperaturas cercanas a 260 C.

Los fieltros de teflón (PFTE) resisten bien los ataques químicos, incluso a temperaturas permanentes de operación superiores a 260 C, por lo que pueden utilizarse con los gases de combustión de las plantas de cogeneración.

Otro tanto cabe decir del Nextel 312 una fibra cerámica de boro/aluminio/silicato de apariencia muy similar a la fibra de vidrio que resiste temperaturas superiores a los 400 C y ha sido ensayada con éxito hasta a 1150 C<sup>28</sup>.



---

<sup>27</sup> Los filtros de papel se denominan filtros de alta eficacia o absolutos. Se emplean en salas estériles de hospitales, instalaciones farmacéuticas y montajes electrónicos de alta precisión.

<sup>28</sup> En la Universidad de Dakota del Norte se han obtenido eficacias filtrantes de hasta el 99.995% con gases procedentes de una caldera de carbón a temperaturas comprendidas entre 450-480 C ([8])

eoi

FIBRA FIBER	POLÉSTER POLYESTER	ACRÍLICO ACRYLIC	POLIAMIDA POLYAMIDE	DRAMMA ARAMID	RYTON	POLIPROPILENO POLYPROPYLENE	POLIVINILO POLYVINYL	POLITETRAFLUORURO DE ETILENO	VIDRIO GLASS	ALGODÓN COTTON	LANA WOLL	
S.G.A. D.N. 62001	PES	PAC	PA	PA-N	RYTON	PP	P.V. D.	PTFE	G <sub>v</sub>	Co	Wo	
MARCAS COMERCIALES Y FABRICANTES MAIN TRADE MARKS AND PRODUCERS	Dacron Du Pont TERITAL Monsieles TRIVIRA Hochel TENGA Soc. Rhodowala TERYLENE I.C.J. BOKER Glanzstoff	ORALON T Bayer ORLON Du Pont CAYLOR Nidon Ponton NIDON Phris ZEPHAN Dow Chemical LEACRIL Monsieles	NYLON Nidon Ponton MILON Monsieles NOLON Bayer NLSAN Ara Calado LALON Selo Vitreos	ARNEX Du Pont	RYTON Pallspin Fibres	NERALON Monsieles PYLEN Monsieles Comp. CONLENE Courtauld NOSTALEN Hochel	LEVAL Monsieles SARAT Dow Chemical BORTL Nidon Ponton MARLAR Phrasis	TEFLON Du Pont GONTELA Dow	FIBERGLASS Owens Corning VEHTOTEX Bolonite e Modighand VETROLON Gowater			
COMPOSICIÓN QUÍMICA CHEMICAL COMPOSITION	POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)	POLYACRYLONITRILE	POLYAMIDE 66. 6. 11	POLYAMIDE AROMÁTICA	POLY(2,6-PYRIDINE DIIMIDE)	POLYPROPYLENE	POLY(VINYLIDENE CHLORIDE)	POLYTETRAFLUOROETHYLENE	SILICE	CELLULOSA	CHERATINA	
ESTRUCTURA MOLECULAR MONOMER STRUCTURAL FORMULA	<chem>C1=CC=C(C=C1)OC(=O)C2=CC=CC=C2C(=O)O1</chem>	<chem>NC(=O)C#N</chem>	<chem>NC(=O)CC(=O)N</chem>	<chem>O=C1C=CC(=O)N1</chem>	<chem>C1=CC=C2C(=C1)N(C)C(=O)N2</chem>	<chem>CC(C)C</chem>	<chem>ClC=CCl</chem>	<chem>ClC(F)(F)F</chem>	SiO <sub>2</sub>	<chem>OC1C(O)C(O)C1O</chem>	<chem>NC(=O)C(C(=O)N)C(=O)N</chem>	
TIPO DE HILO (A) YARN TYPE (A)	S F M	S F	S F M	S F	S	S F M	S F M	S F M	S F	S	S	
PESO ESPECÍFICO SPECIFIC GRAVITY	g/cm <sup>3</sup>	1,28	1,15 + 1,17	1,04 + 1,04	1,30	0,91	1,26	2,1	2,5	1,52	1,30	
RETENCIÓN DE HUMEDAD MOISTURE RETENTION	20 °C H.A. 65 %	0,4	1 + 2	4	3	0,0	0,05	0,05	0	7 + 8	17 + 10	
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN TENILE STRENGTH	g/arn	43 + 75	2,4 + 43	43 + 75	3	2,8 + 23	43 + 6	3	1,6	10 + 15	2,5 + 5	1,2 + 1,7
ALARGAMIENTO A LA RUPTURA ELONGATION AT BREAK	%	11 + 14	17 + 42	10 + 20	10 + 20	25 + 35	35	35 + 40	15	2 + 4	5 + 7	30 + 40
TEMPERATURA MÁXIMA CONTINUA MAX CONTINUOUS TEMPERATURE	°C	130 + 135	130 + 135	100 + 110	300 + 320	100	80 + 90	80 + 90	240 + 260	200 + 200	90 + 100	80 + 90
PUNTA MÁXIMA DE TEMPERATURA MAX TEMPERATURE (PEAK)	°C	140	135 + 140	130	200	220	90 + 100	90 + 100	200	110	100	
RESISTENCIA QUÍMICA (B) CHEMICAL RESISTANCE (B)												
ACIDOS FUERTES STRONG ACIDS	0 0 0	0 0 0	0	0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0	0 0	
ACIDOS DEBILES WEAK ACIDS	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0	0 0 0	
ALCALIS FUERTES STRONG ALKALIS	0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0	0 0 0	0	
ALCALIS DEBILES WEAK ALKALIS	0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0	
DISOLVENTES SOLVENTS	0 0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0	0	0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0	
OXIDANTES OXIDIZING AGENTS	0 0 0 0	0 0 0	0 0	0 0 0	0	0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0	0	
HIDROLISIS HYDROLYSIS (MOIST HEAT)	0	0 0 0 0	0 0	0 0	0 0 0	0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0	
DISOLVENTES ESPECÍFICOS PARA LAS FIBRAS FIBERS SPECIFIC SOLVENTS	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> NO C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	HNO <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> COOH HOOCN H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ACID FORTI	HNO <sub>3</sub>	ISOCARBURON SOLVENTI CLORURATI	CH <sub>3</sub> COOH, CHCl <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>	F (nacetone)	HF	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH	

eoi





Como inconvenientes de este tipo de filtros, cabe citar los riesgos de explosión para ciertos materiales pulverulentos, así como la imposibilidad de manejar materiales higroscópicos debido a los problemas de limpieza de mangas.

Las aplicaciones de los filtros de mangas en las instalaciones de cogeneración basadas en combustibles sólidos están limitadas por las temperaturas de trabajo, ya que para los tejidos y filtros comerciales actuales las temperaturas deben ser inferiores a 250 C para evitar la abrasión e incendio de las mangas.

Las investigaciones actuales de nuevos materiales como la fibra de vidrio, el metal, o la fibra cerámica pueden modificar esta situación en el futuro.



Así la Planta de Gasificación Integrada de Ciclo Combinado de Puertollano (Ciudad Real), incorpora dos tipos de filtros cerámicos : de candelas (el gas contaminado fluye hacia adentro), y de tubos (el gas fluye hacia fuera).

Los filtros tienen las características siguientes :

PARAMETRO	CANDELA	TUBO
Caudal de gas, kg./s	2	2
Temperatura, C	800	800
Presión , bar	11	11
Partículas, ppm	5000	5000
Material	Dia-Shumalit	Beta-cordierite
Número de elementos	48	5
Longitud del elemento ,m	1.5	8,55
Diámetro, mm	60	170
Espesor,mm	15	15+5
Velocidad de filtración m/s	0,052	0,038
Area de filtración, m2	12,5	17
Limpieza	Jet pulse	Jet pulse
Recipiente		
Altura,m	7	12,3
Diámetro,m	1,5	1
Volumen,m3	10,3	9,5
Peso vacío,Kg	14500	15000

El tiempo de uso de las mangas es variable oscilando entre 6 y 24 meses, con lo que puede deducirse la importancia del costo de las mangas en el total de operación, y el interés en la selección de las mangas adecuadas y las temperaturas de trabajo óptimas..

Las inversiones necesarias para la instalación de filtros de mangas, dependen decisivamente de estas<sup>29</sup>, así, el coste total de las mangas se sitúa entre el 5 y el 20% del coste total de la instalación.

<sup>29</sup>A título informativo, para la depuración de gases procedentes del enfriador de clínker de una cementera a unos 230 C, se instaló una batería de filtros con tela tipo Nomex, a un costo específico de 170 \$ US/m<sup>2</sup> (1993).

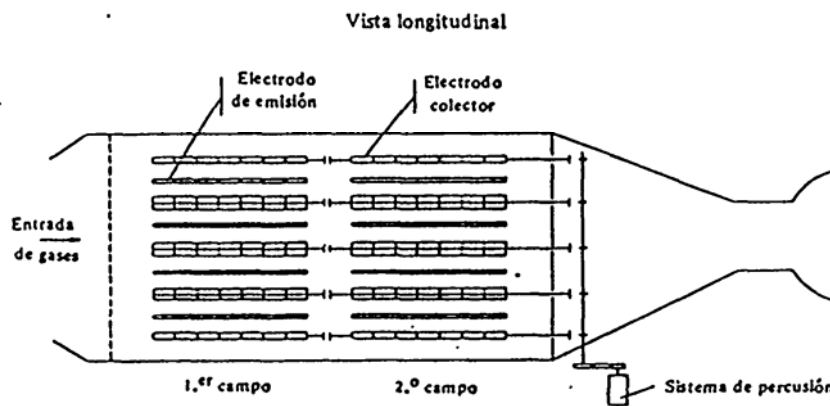
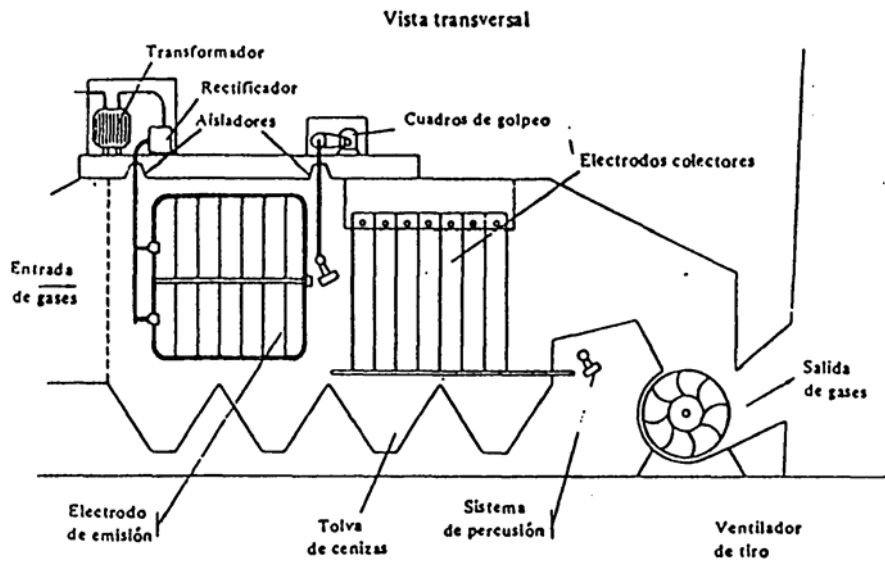
Para los servicios a alta temperatura los costes para los distintos tipos de mangas se situarían en porcentaje del siguiente modo ([8]) :

<b>TEJIDO/FILTRO</b>	<b>COSTE(%)</b>
FIBRA DE VIDRIO (260 C)	100
POLIESTER (135 C)	75
TEFLON (>260 C)	600-800
POLIIMIDA (260 C)	300-400
NOMEX (210 C)	100-200
NEXTEL (1150 C)	>800

eoí

### 7.1.3-PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS

El mecanismo de funcionamiento de los precipitadores electrostáticos está basado en la carga eléctrica de las partículas de la corriente gaseosa, y la separación de las mismas por la acción de un campo eléctrico.



Se emplean para eliminar partículas de corrientes gaseosas que pueden ionizarse fácilmente ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ), ya que lo requiere el proceso de separación, el cual se lleva a cabo en las siguientes etapas :

### **GENERACION DE ELECTRONES LIBRES (EFECTO CORONA)**

Se crea un campo eléctrico aplicando una diferencia de potencial muy elevada entre el electrodo de emisión (normalmente un hilo metálico fino o un tubo con pequeños picos) y el de colección (una placa) lo que produce en las proximidades del primero la ionización del gas (efecto corona) formando pares de electrones libres e iones positivos, desplazándose estos últimos hacia el electrodo de emisión..

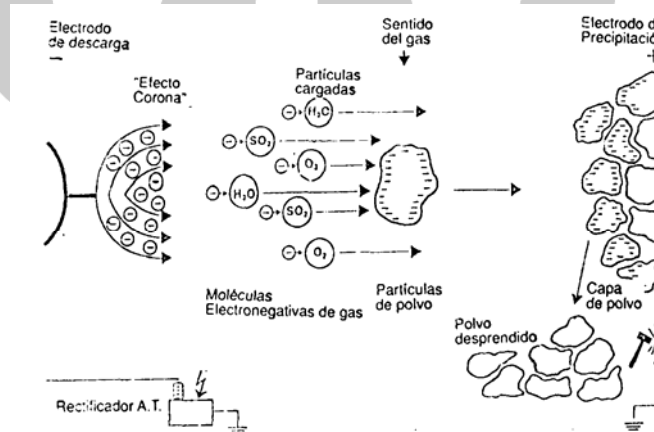
### **IONIZACION DE LOS GASES**

Los electrones libres emitidos por el efecto corona, adquieren una gran velocidad en las cercanías de los hilos emisivos, ionizando por choque las moléculas con gran afinidad por los electrones ( $H_2O$ ,  $O_2$ ;  $SO_2$ ) y produciendo de este modo iones negativos que se desplazan rápidamente hacia los electrodos receptores.

En su desplazamiento estos iones se fijan a las partículas en suspensión de los gases con lo que estos adquieren rápidamente (fracciones de segundo) carga negativa, desplazándose a su vez hacia los electrodos receptores.

### **DEPOSITACION DE PARTICULAS**

Al llegar al electrodo la partícula se descarga y queda sobre la placa, formando una capa que si el polvo es seco, se elimina periódicamente mediante vibración o por procedimientos eléctricos, y cae en una tolva de la que se extrae al exterior<sup>30</sup>.



<sup>30</sup> Cuando las partículas son líquidas, la película desciende por gravedad.

El fenómeno de la precipitación electrostática puede interpretarse haciendo uso de la expresión del rendimiento debida a Deutsch :

$$\eta = 1 - e^{-\omega \frac{A}{Q}}$$

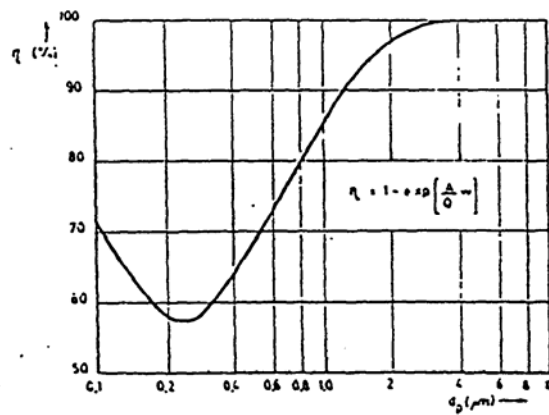
En donde :

$\omega$  : Velocidad de migración, m/s

A : Superficie de captación, m<sup>2</sup>.

Q : Volumen de gas, m<sup>3</sup>/s

La mayoría de estos precipitadores trabajan con eficacias del 95 al 99 por 100.



Esta eficacia depende como puede observarse de :

- Área específica de descarga (A/Q), o velocidad del gas a través del filtro.
- Velocidad de migración

El área específica de descarga, definida como la relación entre el área de los electrodos colectores y el caudal de gas, es considerada adecuada si se encuentra en torno a 180 m<sup>2</sup> /1m<sup>3</sup>/s.

En cuanto a la **velocidad de migración** es un factor derivado de la experiencia y que depende de una serie de factores, el más importante de los cuales es la **resistividad** de las cenizas.

Así, la velocidad de migración se reduce en un 200-300% cuando hay que tratar cenizas altamente resistivas.

Pero la resistividad no solo influye en la eficacia de depuración, ya que en el funcionamiento de los electrofiltros se pueden producir dos fenómenos desfavorables causados por resistividades fuera del rango óptimo :

- **RETRODESCARGA**

Cuando la corriente de emisión pasa a través de la capa de polvo, se crea una diferencia de potencial, la cual si llega a ser mayor que la rigidez dieléctrica del polvo, da lugar a descargas eléctricas en el seno del mismo formándose iones positivos y negativos.

Los primeros son atraídos al electrodo de descarga, rompiendo la capa de polvo, y reduciendo la carga de las partículas que migran, y reduciendo en suma la eficacia del filtro.

- **DESPRENDIMIENTO**

Cuando la resistividad es baja, por el contrario, las partículas no son capaces de mantener la carga una vez depositadas en el colector, y por tanto son reastradas nuevamente al flujo de gases.

La resistividad del polvo está influenciada por los factores siguientes ([9]):

- **Construcción, geometría y alimentación eléctrica del filtro.**

La tensión de alimentación depende decisivamente de la resistividad del polvo. Cuanto mayor es la resistividad de este, menor debe ser la tensión para evitar los efectos de retrodescarga.

- **Tipo de caldera y método de combustión.**

Las calderas alimentadas con carbón pulverizado producen cenizas más gruesas que las alimentadas por ciclón.

Las de alimentación tipo Stoker se caracterizan por un alto contenido en carbón sin quemar lo que reduce la resistividad.

- **Tipo de carbón y contenido en cenizas.**

Los carbones con un contenido bajo de azufre (<1%) tienen tendencia a producir cenizas difícilmente separables.

- **Composición de las cenizas**

Un contenido bajo en sodio da lugar a unas cenizas volantes altamente resistivas, y otro tanto cabe decir del silicio y la alúmina. El hierro y el potasio por el contrario contribuyen a conferir una baja resistividad.

- **Curva de granulometría**

Generalmente las partículas grandes son más fáciles de separar que las pequeñas, dado que la velocidad de migración es proporcional al diámetro.

Un alto número de partículas de pequeño tamaño reduce la eficacia del depurador. En términos generales, la caída de eficacia se produce en el rango de 0.1 a 1  $\mu\text{m}$ .

- **Temperatura del gas y contenido de agua del gas.**

La resistividad del polvo varía de acuerdo a la temperatura en forma de una parábola invertida que tiene su máximo en el intervalo de 140-250 C, acercándose al límite superior cuando mayor es la humedad<sup>31</sup>.

La resistividad de la mayoría de las partículas procedentes de operaciones industriales está en el rango de  $10^4$  a  $10^{10}$  ohm-cm. Este es un rango bueno para el funcionamiento de los precipitadores.

En los casos en que la resistividad se encuentre fuera de estos rangos, se recurre a los siguientes métodos :

- **ACONDICIONAMIENTO DE LOS GASES**

Al quemar carbones con bajo contenido en azufre se disminuye la resistividad, por cuanto el SO<sub>3</sub> es uno de los factores que más influencia tiene en ella.

<sup>31</sup> Con las temperaturas altas la resistividad depende poco del contenido de vapor de agua. Para temperaturas bajas por el contrario, la resistividad se reduce significativamente aumentando el contenido de agua.



Para aumentar esta se suele acudir a la adición de SO<sub>2</sub>, que posteriormente se oxida con un catalizador.

Este sistema tiene no obstante el inconveniente de producir corrosiones (para bajas temperaturas) y desplazar el impacto ambiental, si no se dispone de sistema de desulfurización<sup>32</sup>

Otra alternativa ensayada con éxito comparable es la adición de NH<sub>3</sub>, la cual presenta la ventaja de ser compatible con sistemas DeNOx

• **GENERADORES DE PULSACIONES**

Consiste en superponer a la corriente continua normal del filtro, impulsos cortos de alto voltaje, con lo que se consigue tensiones de pico mayores con lo que se mejora la carga de las partículas, y sin que se produzcan chispas.

Este sistema mejora el funcionamiento con polvo de alta resistividad pero presenta la desventaja de requerir energía eléctrica adicional, que es necesario recuperar para un funcionamiento económico del mismo.

Los filtros normalmente usados en las centrales térmicas se construyen con anchuras de hasta 30 m. y altura de placas de precipitación de hasta 15 m, con lo que se pueden construir filtros para tratar hasta 2 mill m<sup>3</sup>/h en una sola cámara.

Aplicaciones comunes de los precipitadores electrostáticos

Industria	Aplicación	Límites del flujo de gas, pie <sup>3</sup> /min*	Intervalo de temperatura, °F	Peso de polvo, % (por debajo de 10)	Eficiencia colectora, %	Int. de conc. de polvo en ppm† por peso de aire	Intervalo de temperatura, K
Potencia eléctrica	Ceiza voltaje generadora de calderas de carbón pulverizado	50,000-750,000	270-600	25-75	95-99+	760-9,500	405-589
Cemento Portland	Poizo de los hornos	50,000-1,000,000	300-750	35-75	85-99+	950-29,000	422-672
Acero	Poizo de los secundarios	30,000-100,000	125-130	30-60	95-99	1,905-29,000	325-450
	Ventilación de los molinos	2,000-10,000	50-125	35-75	95-99	9,500-98,000	283-325
	Limpieza de los otros hornos de gas por combustible	20,000-100,000	90-130	100	95-99	38-950	306-317
Metales no ferrosos	Recolección de alquitrán de los gases de hornos de coque	50,000-200,000	80-120	100	95-99	190-1,905	300-322
	Recolección de humo de los hornos eléctricos y abiertos	30,000-400,000	300-700	95	90-99	95-5,700	422-644
	Humo de hornos, tostadores, máquinas de sinterizado, flama de aluminio, etc.	5,000-1,000,000	150-1100	10-100	90-98	5,700-95,000	339-867
Pulpa y papel	Recuperación de sosa en los molinos de pulpa	50,000-200,000	275-350	99	90-95	950-7,600	408-450
Química	Nebulinas ácidas	2,500-20,000	100-200	100	93-99	38-1,905	311-367
	Limpieza de hidrógeno, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , etc.	5,000-20,000	70-200	100	90-99	19-1,905	295-367
	Separación de polvos de vaporizadores fosforosos	2,500-7,500	500-600	30-85	99+	19-1,905	533-589
Petróleo	Recuperación de polvo de catalizador	50,000-150,000	350-550	50-75	90-99.9	190-4,800	450-561
Productos rocosos	Tejados, magnesita, dolomita, etc.	5,000-200,000	100-700	30-45	90-98	950-4,800	311-644
Gas	Aliquitrán de gas	2,000-50,000	50-150	100	90-98	19-3,800	283-339
Carbón negro	Recolección y aglomeración de carbón negro	20,000-150,000	380-700	100	10-35	57-9,500	422-644
Yeso	Polvos de hervideros, convertidores, etc.	5,000-20,000	250-350	95	90-98	2,850-9,500	394-450

FUENTE: Holden y Ackley, *Air Pollution Handbook*, McGraw-Hill.  
 \* pie<sup>3</sup>/min = 4.72 (10<sup>-4</sup>) m<sup>3</sup>/s  
 † 1 ppm = 0.325 gr/1 000 pie<sup>3</sup> = 2 mg/m<sup>3</sup>, en abs.

Los filtros se construyen en varias secciones cada una de las cuales tiene una longitud de 2.5 a 5 m.

<sup>32</sup> La cantidad necesaria es normalmente baja, por cuanto estos sistemas se diseñan para una concentración de SO<sub>3</sub> de 50 ppm.





Los rectificadores se caracterizan normalmente por su valor de tensión máximo que para los filtros normalmente usados en las centrales térmicas es de 90 KVp, con corrientes medias de emisión entre 250 mA y 2000 mA.

La distancia entre electrodos de colección suele ser de 300 mm., y se recomienda que la superficie de precipitación para cada zona eléctrica no supere los 3000 m<sup>2</sup> para obtener el máximo rendimiento.

El consumo de energía para rectificadores, resistencias de calefacción, sistemas de golpeo etc., varía poco en relación con el rendimiento, siendo aproximadamente de 0.15 KW/m<sup>3</sup> de volumen de electrodos ([9])

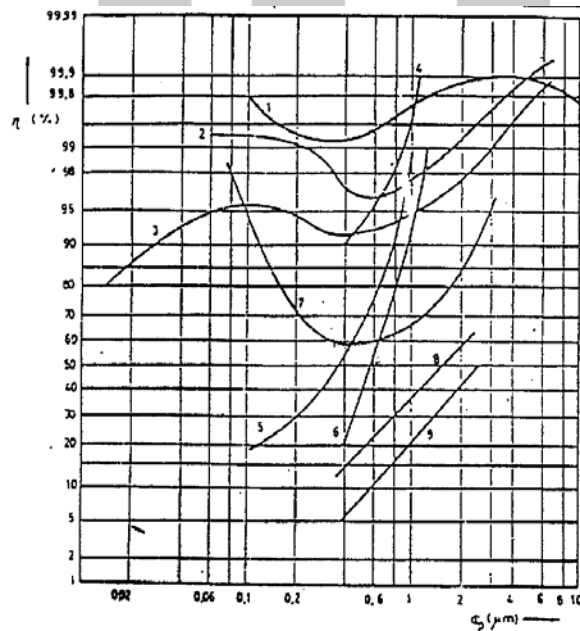
Los precipitadores electrostáticos reúnen una serie de ventajas como son su alta eficacia y su relativamente moderado consumo de energía junto con unas necesidades de mantenimiento no muy exigentes, aunque mayores que los sistemas mecánicos descritos anteriormente.

Presentan la ventaja frente a los filtros mangas en que pueden trabajar con gases húmedos, su consumo energético está ligado a la concentración de partículas y no al volumen de gas (véase página 32).

Así una corriente gaseosa de 65000 m<sup>3</sup>/h con un tamaño medio de partículas de 7 µm procedentes de un proceso de combustión puede depurarse en un 99.9 por 100 con unos costes anuales de electricidad de 1 millón de pesetas (1990) §.

7.1.4.-COMPARACION ENTRE EQUIPOS DE DEPURACION DE PARTICULAS

ASPECTO	CICLONES	LAVADORES	MANGAS	ELECTROST
Partículas gruesas	X			
Partículas finas		X	X	X
Recuperación de material	X		X	X
Gases combustibles	X	X	=	
Volúmenes altos	X			X
Volúmenes bajos			X	
Temperaturas altas	X	=		
Depuración del gas		X		



Eficacia de recogida en función del diámetro de las partículas para distintos sistemas de eliminación: 1. Filtro de mangas; 2. Precipitador electrostático (caliente); 3. Precipitador electrostático (frío); 4. Venturi-scrubber ( $\Delta P = 2540$  mm c.d.a.); 5. Venturi-scrubber ( $\Delta P = 508$  mm c.d.a.); 6. Venturi-scrubber ( $\Delta P = 254$  mm c.d.a.); 7. Scrubber de contacto turbulento ( $\Delta P = 305$  mm c.d.a.); 8. Multiciclón; 9. Ciclón de alta eficacia.

## 7.2.-DEPURACION DE GASES

### 7.2.1.-ABSORCION

En la absorción<sup>33</sup> de gases se absorbe un gas contenido en una mezcla junto a otros inertes, mediante un líquido en el que aquel es más o menos soluble

El soluto puede recuperarse posteriormente por métodos físicos (destilación, desorción<sup>34</sup> etc.) o químicos y el líquido absorbente puede reutilizarse o bien ser desechado.

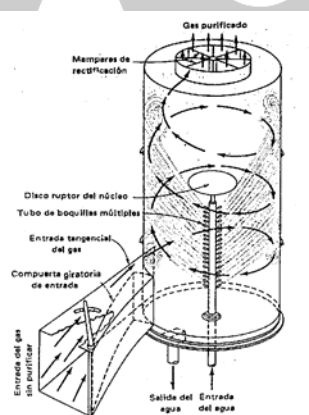
Son los equipos más empleados para controlar las emisiones inorgánicas. Normalmente los separadores vía húmeda alcanzan eficacias del 90 al 99.99 por 1.00.

En principio, este tipo de separadores pueden dividirse en dos grupos, las torres de pulverización y las de relleno, cuyas características son :

- **TORRES DE PULVERIZACION**

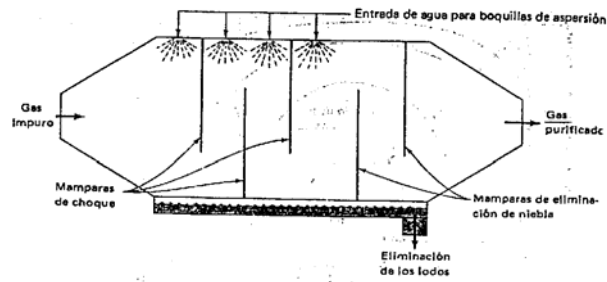
Las torres de pulverización atomizan un líquido por la parte superior de la torre. Las gotas caen mientras el gas asciende en contracorriente (la forma más habitual de trabajo). En su caída las gotas arrastran a las partículas y disuelven algunos componentes del gas portador. En la parte superior se instala un separador de gotas para retener el líquido arrastrado por el gas.

Estas torres son fáciles de instalar y mantener y tienen unas necesidades energéticas bajas. Precisan, sin embargo, caudales importantes de líquido (3 a 14 l/m<sup>3</sup> de gas) y tienen una baja eficacia cuando se emplean para eliminar partículas inferiores a 5 micras. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que generan residuos líquidos, que deben depurarse.



<sup>33</sup> No confundir con la adsorción que se tratará en el apartado siguiente.

<sup>34</sup> Consiste en poner en contacto la mezcla líquida con un gas inerte.

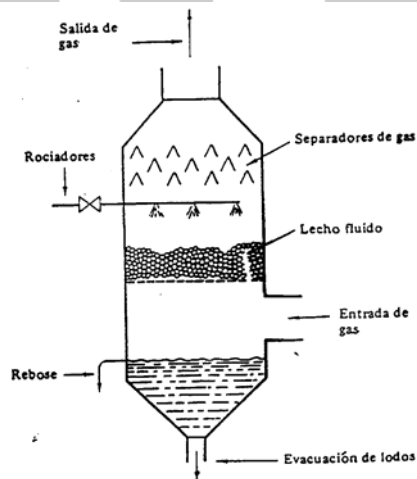


Esquema de un lavador de placas de choque húmedas.

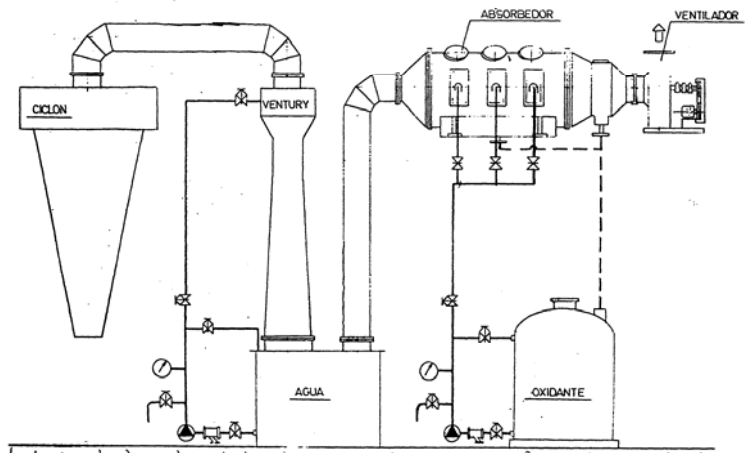
• **TORRES DE RELLENO**

Las torres de relleno introducen el líquido por la parte superior de la columna y éste cae por entre el material de relleno que se coloca para incrementar la superficie de transferencia líquido-gas minimizando las pérdidas de carga. El gas puede introducirse en varios puntos del sistema. Como en el caso de las torres de pulverización, un separador de gotas retiene las partículas líquidas arrastradas por el gas.

Los caudales de líquido en las torres de relleno suelen ser de 1 a 3 l/m<sup>3</sup> de gas). Estos equipos son más caros que las de atomización y los costes de operación son, a su vez, más elevados.



ESQUEMA -INSTALACION ELIMINACION DE PARTICULAS - ABSORCION



eoi

Otros equipos empleados en absorción son :

- **TORRES DE LAVADO DE PLATOS**
- **LAVADORES VENTURI**
- **LAVADORES MECÁNICOS.**

Estos dos últimos equipos trabajan con mayores pérdidas de carga y por tanto, sus necesidades energéticas son mayores, pero, se utilizan bastante cuando se pretende eliminar partículas.

Los diseños en contracorriente son más frecuentes aunque también son los que necesitan mayores caudales de líquido. Se emplean cuando el gas lleva una alta concentración de partículas sólidas.

La configuración en flujo cruzado tiene las ventajas de la pequeña pérdida de carga y de que los atascos son difíciles pero exige una gran solubilidad de los contaminantes a eliminar. También se presta a mayores arrastres de líquido.

Finalmente, el sistema en equicorriente se emplea para eliminar partículas finas (inferiores a una micra). Tienen la ventaja de su pequeña pérdida de carga y la ausencia de inundaciones.

### 7.2.2.-DESULFURACION

Los sistemas para la eliminación de óxidos de azufre de los gases de combustión, se clasifican en tres grandes grupos según el modo de adición del reactivo :

#### **A.-Sistema húmedo**

Los sistemas más empleados hasta el presente son los de **lavado húmedo** de la corriente gaseosa mediante:

-Solución acuosa de carbonato cálcico o hidróxido cálcico : conduce a la formación de sulfito o sulfato cálcico según el estado de oxidación del azufre. Los cristales formados, poco solubles en agua, se llevan a una balsa de clarificación para que sedimenten o bien a filtración, empleándose los sólidos en el relleno de terrenos.

-Hidróxido sódico, carbonato o bicarbonato sódico: producen sulfito o sulfato sódico que se disuelve en el líquido, que suelen llevarse a balsas para la evaporación del agua o a pozos<sup>35</sup>. Los productos a base de sosa son más reactivos pero más caros que los basados en el calcio.

-Agua de mar : absorbe los óxidos de azufre y produce una corriente líquida que puede devolverse al mar tras un tratamiento de neutralización con más agua de mar y una aireación para eliminar el dióxido de carbono que estuviera presente y oxidar el SO<sub>2</sub>.

El proceso se inicia con la inyección en una o varias torres de lavado de un exceso de líquido, que enfría los gases por debajo de la temperatura de condensación, y son captados por las gotas del fluido lavador en donde se produce la reacción con el agente activo.

El líquido se recircula a la torre de lavado, excepto una parte que es continuamente drenada a fin de separar los contaminantes y mantener el nivel de pH.

Los equipos de lavado húmedo son también capaces de eliminar partículas presentes en la corriente gaseosa, lo que presenta una ventaja adicional para este tipo de sistemas.

Para asegurar una buena desulfuración se suele recomendar la eliminación previa de partículas o bien dos etapas de lavado : la primera consiste en un equipo Venturi que elimina las partículas, la segunda es una torre de atomización, relleno o platos para eliminar el SO<sub>x</sub>

Los principales inconvenientes del sistema húmedo son :

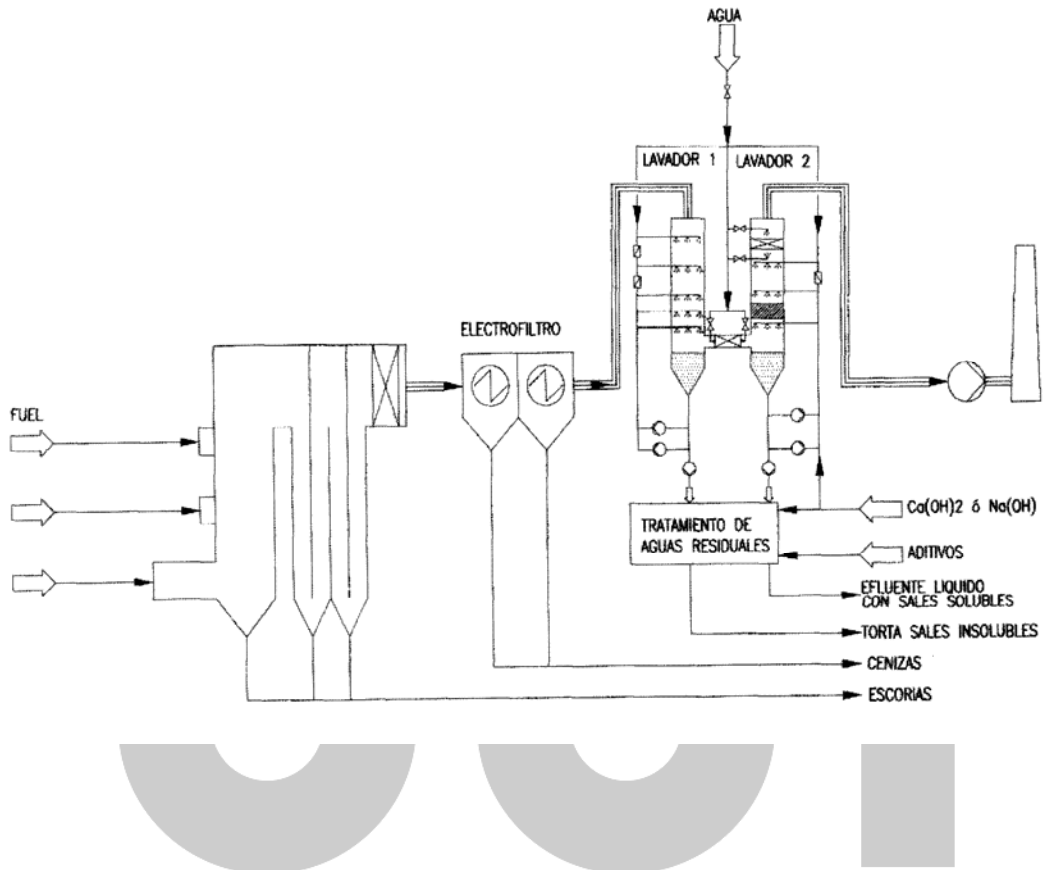
-Necesidad de enfriamiento hasta la temperatura de saturación de los gases, lo que hace necesario recalentar el gas depurado o instalar una chimenea resistente a la corrosión.

---

<sup>35</sup> También se utiliza un proceso denominado dual que emplea simultáneamente dos tipos de soluciones, una conteniendo hidróxido sódico, carbonato y bicarbonato sódicos y otra con óxido cálcico.

- Formación de un penacho de vapor lo que puede provocar problemas en la población del entorno afectado<sup>36</sup>.
- Tratamiento del agua residual de lavado, con un alto contenido en sales y metales pesados.

Este sistema presenta, no obstante la ventaja, de presentar un bajísimo consumo de reactivo, con altas eficacias de recuperación.



<sup>36</sup> Este inconveniente puede obviarse mediante una etapa de condensación, seguida de un recalentamiento de los gases.



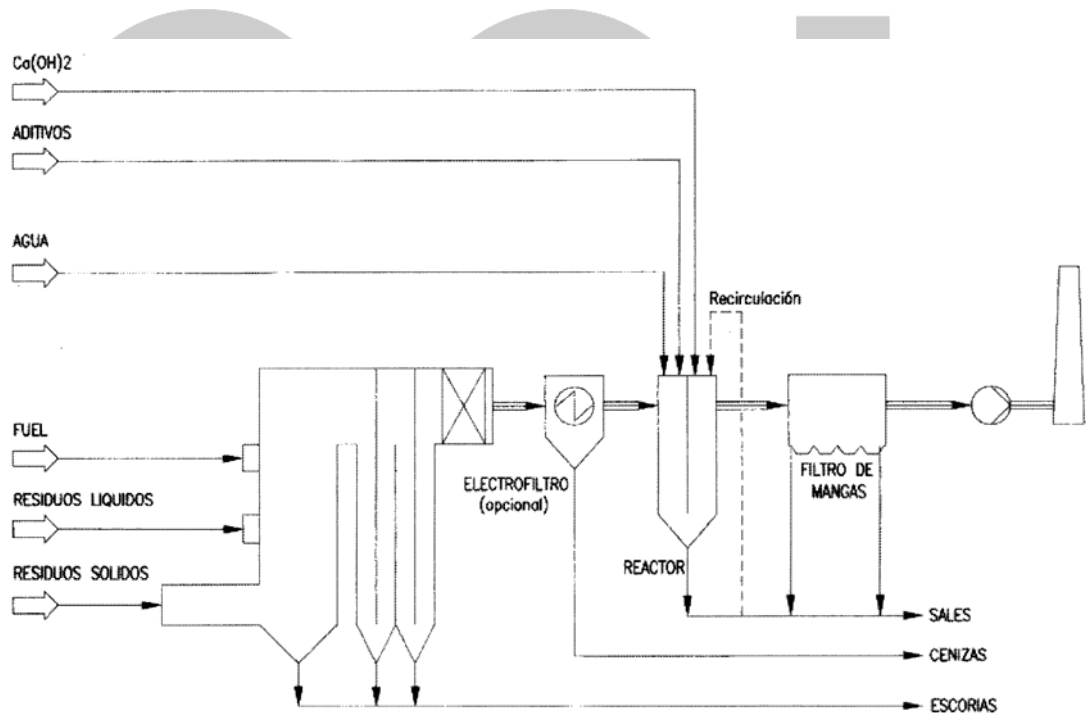
## B.-Sistema seco

En los lavadores secos, primero se inyecta agua hasta que la temperatura de los gases disminuye a unos 130 °C, para, a continuación pulverizar el reactivo seco ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  generalmente), que reacciona con el  $\text{SO}_x$  (y otros compuestos como el HF, o el HCl).

Los productos de reacción son posteriormente separados en un filtro de partículas<sup>37</sup>, previa recirculación de una parte del flujo.

Los sólidos retenidos en el mismo, son también recirculados parcialmente al proceso, por cuanto incluyen una importante cantidad de cal que no ha reaccionado.

Los factores que influyen en la eficacia del proceso son el descenso de temperatura y el exceso de cal<sup>38</sup>



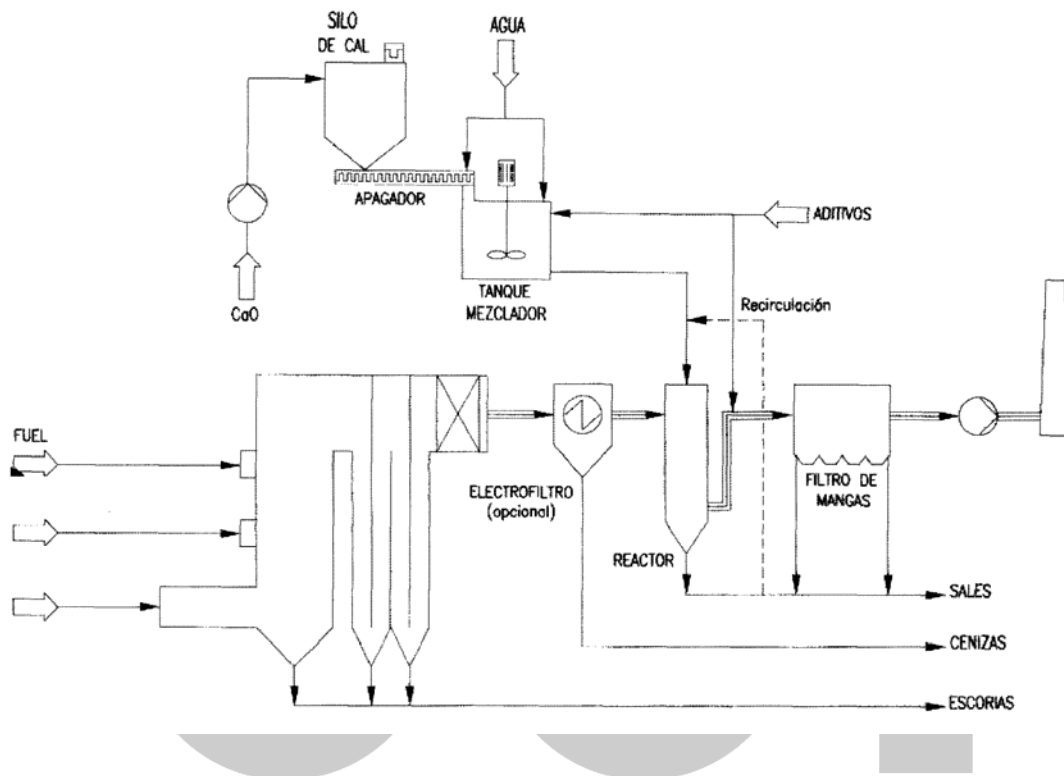
<sup>37</sup> Son preferibles los filtros de mangas, a los electrofiltros, por cuanto en aquellos tiene lugar una postreacción sobre la capa de polvo que aumenta la eficiencia de depuración.

<sup>38</sup> Excesos de 1.5 a 2 sobre el estequiométrico.

### C.-Sistema de semiseco

En los **procesos semisecos**, el calor del gas evapora el agua (con lo que se reduce también la temperatura de los gases) de la lechada de cal (o carbonato sódico) produciendo un producto seco que puede recuperarse del gas en un filtro de mangas o en un electrofiltro.

Los procesos mencionados no permiten la recuperación de los absorbentes empleados aunque los productos obtenidos pueden, en algunos casos comercializarse.



En el cuadro siguiente se muestran algunos datos comparativos de los distintos sistemas

<b>METODO</b>	<b>EFICACIA %</b>
Húmedo	85 a 98%
Seco	75 a 85%
Semiseco	75 a 85%

A título ilustrativo, se muestran a continuación los datos principales del proyecto de un sistema de desulfuración vía húmeda en una central térmica ([2]).

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Nombre	CT de Belchatow
Situación	Varsovia (Polonia)
Potencia eléctrica	12x360 Mwe
Combustible	Carbón
Contenido de azufre	0.7 % (máx. 1.2%)
Consumo anual	10000 t/a
Emisiones anuales de SO <sub>2</sub>	240000 t/a
Sistema	Húmedo
Reactivo	CaCO <sub>3</sub>
Temperatura de entrada del gas	135 C
Temperatura de salida	65 C
Recalentamiento	75 C
Eficiencia	90 % aprox.
Número de grupos de depuración	4
Coste total	145 000 000 \$US

### 7.2.3.-DESNITRIFICACION

El NO<sub>x</sub> es un contaminante de naturaleza distinta al SO<sub>2</sub> por cuanto sus emisiones no se deben solo a las características del combustible sino que dependen sensiblemente de las condiciones de combustión (presión, temperatura, exceso de aire etc.), del factor de potencia y de los quemadores empleados.

La formación de NO<sub>x</sub> en la combustión se realiza mediante tres mecanismos :

- Oxidación del nitrógeno del aire de combustión.
- Oxidación del nitrógeno del combustible.
- Reacción de radicales de nitrógeno, formados por interacción de radicales libres de hidrocarburos con el nitrógeno molecular y oxígeno atómico.

Entre las técnicas para la minimización de la formación de óxidos de nitrógeno cabe citar :

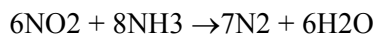
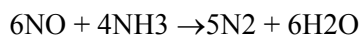
- Reducción del índice de exceso de aire
- Enfriamiento de la zona de combustión.
- Recirculación de los gases de combustión
- Combustión por etapas.

Entre las técnicas especiales para la eliminación de NO<sub>x</sub><sup>39</sup>

- Descomposición catalítica : consiste en descomponer directamente el NO en N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. No es de aplicación en los sistemas de cogeneración, dada la alta temperatura requerida.
- Reducción selectiva : da lugar también a la formación de nitrógeno molecular. Puede ser catalítica, SCR (el reactivo añadido actúa preferentemente sobre el NO<sub>x</sub>), o no catalítica, NSCR (el reactivo actúa sobre el NO<sub>x</sub> previa reacción con el O<sub>2</sub> residual).

La reducción catalítica fue desarrollada en Japón en los años 70, y actualmente es una de las técnicas más utilizada para la depuración de NO<sub>x</sub> de los gases de combustión.

La reducción se puede llevar a cabo con H<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> o H<sub>2</sub>S, cuando se utiliza NH<sub>3</sub> las reacciones que se producen son del tipo :



La inyección de NH<sub>3</sub> se efectúa a una concentración en torno al 5%.<sup>40</sup>

Estas reacciones tienen lugar en presencia de un catalizador apropiado, que puede ser de los siguientes tipos :

<sup>39</sup>El NO<sub>x</sub> puede ser eliminado también por técnicas tales como la adsorción o absorción, comunes para otras sustancias.

<sup>40</sup>El límite de inflamabilidad del NH<sub>3</sub> en aire es del 15%.



-Oxidos metálicos ( $V_2O_5$  y  $WO_3$  o  $MoO_3$ , sobre una base de  $TiO_2$ ) : son los más utilizados por su alta eficacia y alta resistencia al envenenamiento por óxidos de azufre. En la figura [1], se muestra de forma aproximada el efecto de la temperatura y concentración de elementos activos sobre la tasa de conversión de  $NO_x$  y  $SO_2$

-Metales nobles (Pt o Pt/Rh) : más eficaces que los de óxidos metálicos, pero con mayor tendencia a oxidar el  $NH_3$ . Son además más sensibles al envenenamiento por óxidos de azufre por lo que solo son adecuados para sistemas de cogeneración basados en gas natural.

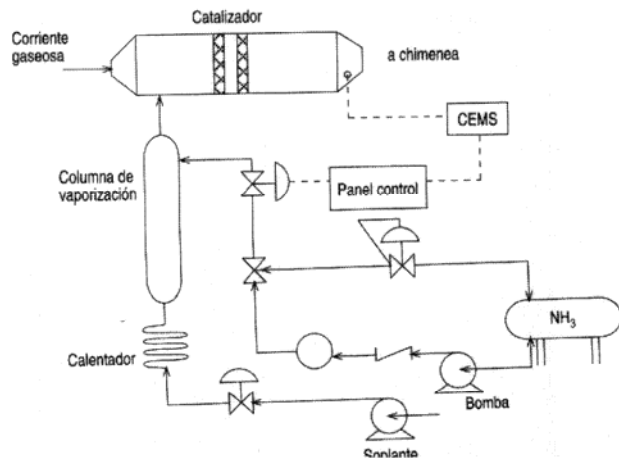
-Zeolitas naturales : poco utilizados dada su limitada resistencia al envenenamiento con óxidos de azufre.

Los catalizadores comerciales se construyen en forma de monolitas cerámicas con estructura en celda de abeja o metálicas con estructura laminar (en cuyas paredes se aplica la capa soporte impregnada con los componentes activos), y ensamblados en forma de módulos para permitir su sustitución o modificación cuando la actividad del catalizador se reduce.

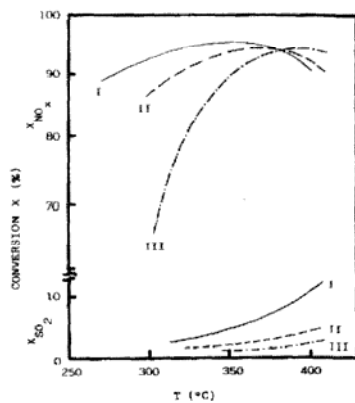
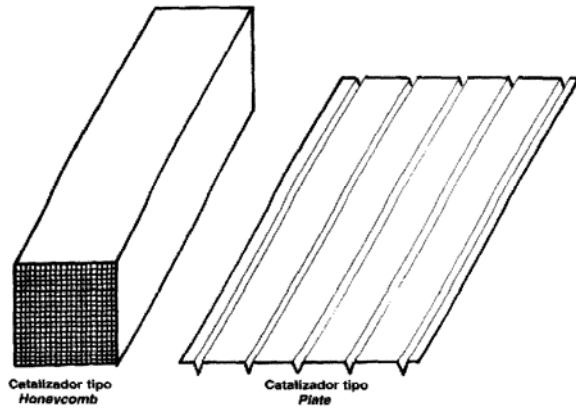
Esta desactivación<sup>41</sup> es más acusada en la zona inicial, por lo que periódicamente es necesario proceder a la redistribución de los módulos que componen el lecho y eventualmente a su sustitución.

---

<sup>41</sup>La reducción de actividad del catalizador es debida principalmente al envenenamiento por compuestos de arsenico y metales alcalinos, y a la formación de bisulfato de amonio en determinadas circunstancias cuando los gases arrastran consigo  $SO_2$



Configuración	Alto contenido en polvo	Bajo contenido en polvo	tail end	Plate
Nº canales	20 x 20	25 x 25	35 x 35	
Dimensiones (mm)		150 x 150 x 1.000		464 x 464
pitch	7,4	5,9	4,2	6,9
Superficie (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	427-444	522	793	285



Efecto de los contenidos de elementos activos sobre la conversión de los NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>

Tipo	Concentración material activo	Combustible
I	Elevado	Gas natural
II	Medio	Fuelóleo
III	Baja	Carbón



eoi

En el cuadro siguiente se muestran algunos datos comparativos de los distintos sistemas

METODO	COSTE RELATIVO	EFICIENCIA %
Modificaciones de la combustión <sup>42</sup>	Medio a bajo.	10 a 50%
Reducción catalítica selectiva	Alto	50 a 90%
Reducción catalítica selectiva	Medio	30 a 80%

El coste de los sistemas de reducción catalítica selectiva oscilaba entre 2500 y 10000 Ptas./KW en 1993 ([1]) dependiendo del volumen y características de los gases.

En cuanto a la reducción no catalítica (NCSR), consiste en la introducción de NH<sub>3</sub> en la corriente de gases a muy altas temperaturas (950-970 C).

El proceso es simple, con costes de inversión bajos, y eficacias de depuración relativamente altas (un 80% para térmicas de carbón), aunque requiere un importante exceso de NH<sub>3</sub>.

La principal desventaja del proceso se halla en las reacciones secundarias que pueden producirse, y los residuos (compuestos amoniacales) que aparecen en los tratamientos de depuración previos ([3]).

<sup>42</sup> Recirculación de gases, combustión escalonada, quemadores de Nox



### 7.2.4.-ADSORCION

Los sistemas citados anteriormente son los más eficientes para la depuración de gases, salvo para el caso de metales pesados y determinados compuestos orgánicos volátiles (como las dioxinas y furanos).

En estos casos se emplea como alternativa a la absorción por líquidos, la adsorción<sup>43</sup> sobre sólidos.

La tecnología de carbón activo constituye la última etapa (cuando es necesaria) dentro de la línea de depuración del gas de combustión, y puede instalarse fácilmente detrás de una depuración vía seca, semiseca o húmeda.

Mediante la adsorción con carbón activo se puede captar multitud de sustancias en forma gaseosa y/o unidas a las partículas sólidas.

Entre estas pueden citarse :

- Sustancias orgánicas como los PCDF, PCDD, PCB, PAH.
- Metales pesados (P. ej. mercurio).
- Otras sustancias inorgánicas como p.ej. SO<sub>2</sub>, HCl, HF.

TIPO DE ADSORBENTE	PRINCIPALES USOS INDUSTRIALES
Tierra de Fuller	Decoloración de fracciones del petróleo, decoloración de aceites comestibles.
Bauxita	Percolación de fracciones del petróleo, deshidratación de gases.
Carbón de huesos	Refino de azúcar.
Carbón activo	Decoloración de sustancias orgánicas e inorgánicas, recuperación de disolventes, eliminación de olores industriales y gases nocivos, purificación de gases industriales, caretas antigás, purificación de hidrocarburos, hipersorción.
Alúmina activada	Deshidratación de gases y líquidos.
Gel de sílice	Deshidratación y purificación de gases, caretas antigás.
Tamices moleculares	Adsorción selectiva de moléculas polares tales como H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S y SO <sub>2</sub> .

Para que el carbón activo desarrolle su máxima eficacia, el gas que sale de la depuración previa con una temperatura normalmente inferior a 100 C, debe ser calentado hasta 120 C.

El calentamiento se puede realizar con un flujo parcial del vapor generado en la caldera.

<sup>43</sup>Retención como consecuencia de reacciones químicas y/o fuerzas superficiales de gases, vapores y líquidos sobre una superficie sólida previa difusión de las moléculas a través de los poros.

El principio de funcionamiento del filtro de carbón activo es de corriente cruzada, es decir los gases de combustión pasan el filtro transversalmente referido al movimiento de avance del carbón activo dentro del filtro.

El filtro de carbón activo dispone de 3 o 4 secciones, que están separadas por chapas perforadas que a su vez garantizan una distribución homogénea del gas de combustión sobre el filtro para tener en cada zona del filtro condiciones similares.

Cada una de las secciones dispone de varias capas con objeto de maximizar el aprovechamiento del carbón, cada una de las cuales dispone de su propio sistema de extracción del carbón activo contaminado.

En los primeros 100 mm. de la primera capa ya se separan:

- Partículas sólidas residuales
- Mercurio
- Dioxinas
- Furanos

En la segunda capa tendrá lugar la separación del resto de  $\text{SO}_2$  y  $\text{HCl}$ .

La última capa funciona como capa de seguridad, pero normalmente ya no participa en la separación, capa casi nunca ha de sustituirse directamente.

La conducción del gas de escape debe ser simple para garantizar la evacuación del calor introducido, asimismo, un diseño óptimo debe prever un alto grado del aprovechamiento del carbón activo para reducir su consumo y así su coste.

Mediante la inyección de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) al gas de escape y utilizando carbón activo a base de hulla en un segundo filtro se puede reducir también los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), actuando de esta manera como un SCR.

En caso de que el gas de escape solamente disponga de una concentración de  $\text{SO}_2$  menor de  $50 \text{ mg/m}^3$  (porque fue tratado en una etapa anterior de desulfuración) se consigue la adsorción y la reducción catalítica del  $\text{NO}_x$  en este mismo filtro de carbón activo, entonces la inyección del amoníaco se realiza delante de la etapa de adsorción.

El caudal de diseño influye directamente en el tamaño del filtro, importante es la sección transversal de la superficie disponible del filtro. Como velocidad óptima se ha encontrado la velocidad de  $0,1 \text{ m/s}$ .

Esta velocidad garantiza:

- Modo de construcción compacto
- Evacuación segura del gas introducido
- Permanencia suficiente del gas dentro del filtro para garantizar su depuración
- Ningún arrastre del material del filtro al equipo post- conectado.

La temperatura del gas de escape en la entrada del filtro debe ser entre  $120\text{-}130 \text{ C}$  para disponer de un margen de seguridad sobre el punto de rocío, ya que una condensación reduciría la eficacia del filtro y además generaría problemas de corrosión de la parte metálica.

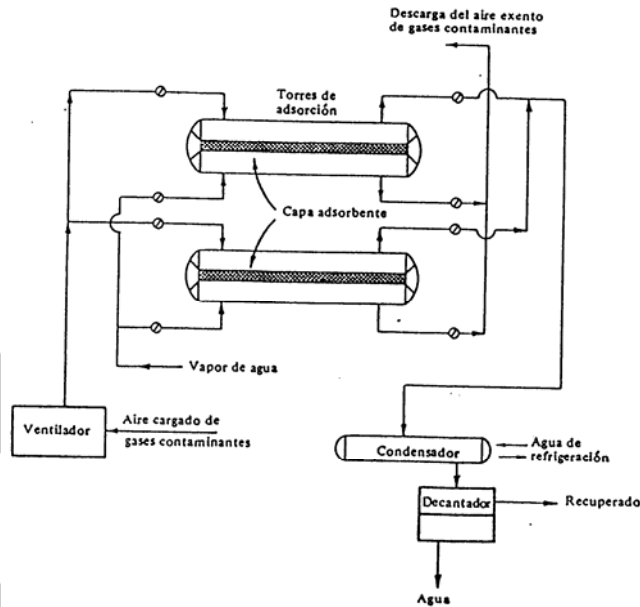


Todo el filtro debe trabajar con una cierta depresión, para asegurar que no habrá fugas hacia el exterior que puedan poner en peligro a los operarios. La pérdida de carga sobre el filtro suele ser de aprox. 25-30 mbar.

eoi

El carbón activo de las capas cargadas de contaminantes ha de ser tratado o eliminado, lo cual puede hacerse de dos maneras :

-Desorción en otra instalación.



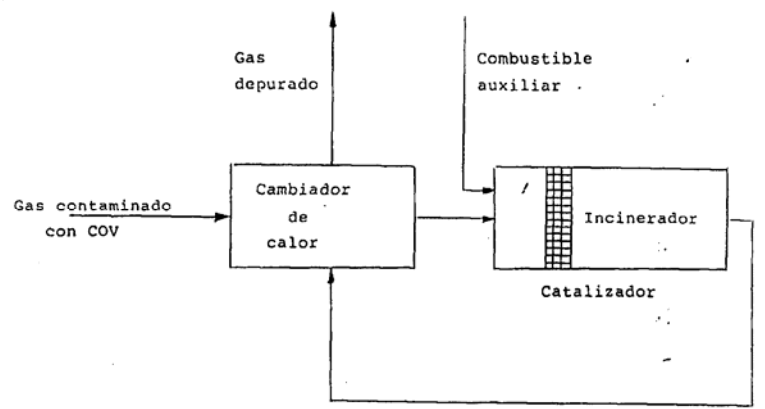
-Incineración del carbón dentro de la caldera: los contaminantes presentes son destruidos (como las sustancias orgánicas) o liberados de nuevo en el proceso (HCl, SO<sub>2</sub>, metales pesados), siendo posteriormente recapturados en la instalación de depuración de gases que precede al filtro, lo que no impide un cierto incremento de la concentración interna de estas sustancias [3]

### 7.2.5.-COMBUSTION

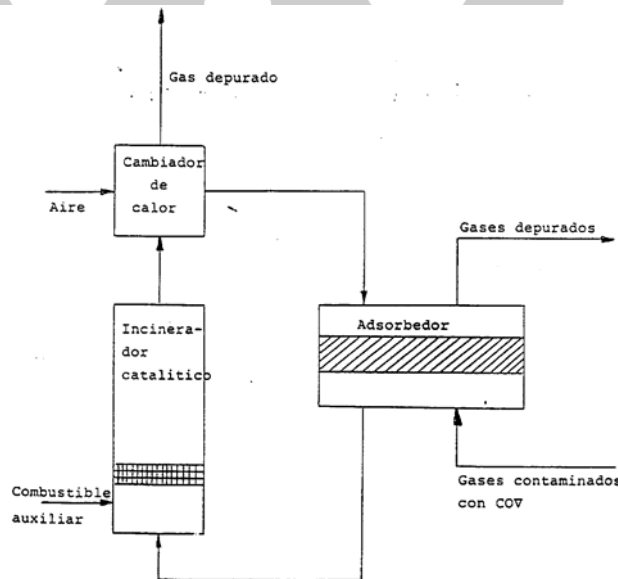
La combustión se emplea principalmente para la eliminación de COV's o cualquier otra sustancia combustible.

Cuando la concentración de COV's es suficientemente elevada, la combustión es autotérmica y no es necesario ningún gasto adicional de combustible, salvo para el arranque

Lo habitual, sin embargo, es que sea necesario emplear algún combustible adicional, así como un elemento catalizador de la reacción.

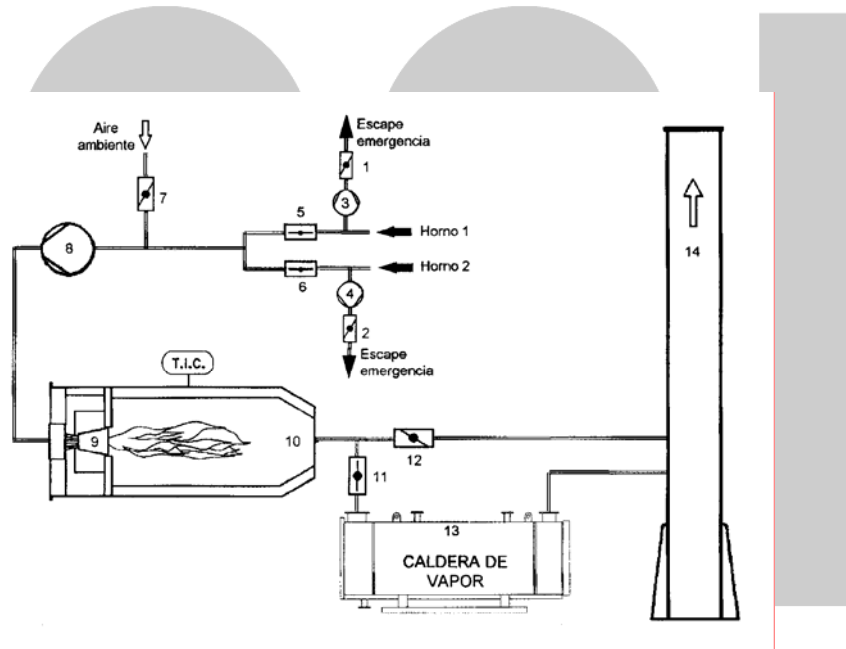


Por último, pueden combinarse los procesos de combustión y adsorción citado anteriormente, empleándose el primero para la regeneración del adsorbente.



EJEMPLO DE INSTALACION

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO		
Caudal de aire	m3/h	12500
Temperatura del aire	C	100
Concentracion de COV's	mg/m3	22000
Consumo de gas	m3/h	25
Vapor producido	kg/h	2600
Concentracion de COV's en chimenea	mg/Nm3	<10
Contenido de CO en chimenea	mg/Nm3	41

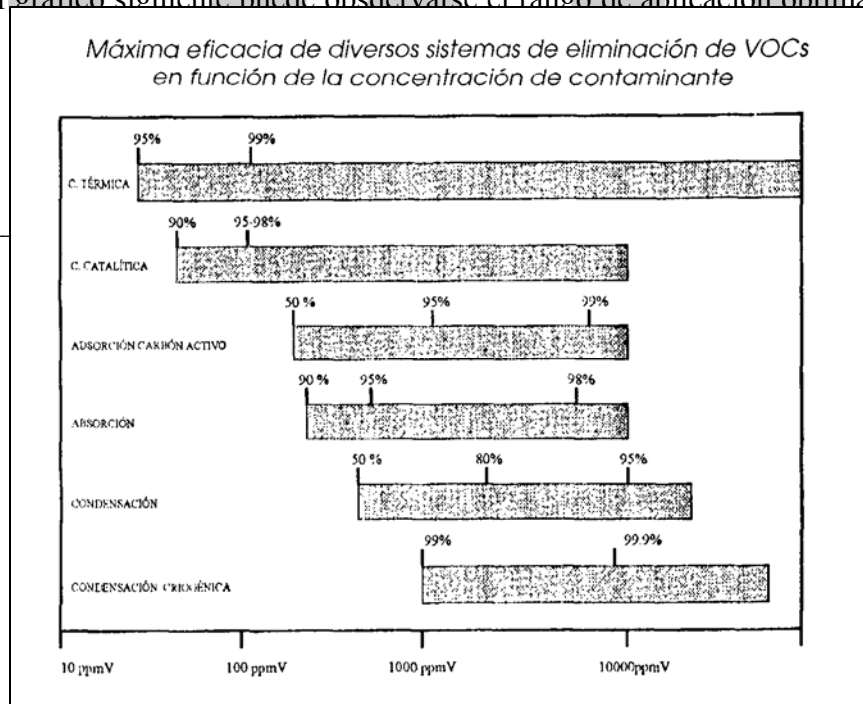


7.2.6.-SISTEMAS DE CONTROL DE COV'S

TECNOLOGIA	CONCENTRACION APLICABLE	CAPACIDAD ENTRE:		INVERSION ENTRE:		COSTE DE OPERACION ENTRE	
	ppm	m3/min	m3/min	Ptas/m3	Ptas/m3	Ptas/m3	Ptas/m3
Combustión termica,c/recuperación	100-2000	28	14000	44500	900000	67000	400000
Combustión catalítica,lecho fijo	100-2000	28	2800	89000	1100000	45000	335000
Condensación	>5000	3	575	44500	355000	90000	540000
Adsorción	20-5000	3	1700	67000	530000	45000	155000
Absorción	500-5000	56	2800	67000	310000	110000	540000

Notas :  
1US\$=125 Ptas

En el gráfico siguiente puede observarse el rango de aplicación óptima de cada sistema :



### 7.2.7.-SISTEMAS DESOX DENOX

Aunque los principales elementos utilizados para el tratamiento de los gases de combustión son básicamente los mismos, su disposición relativa y sobretodo la del reactor catalítico permite distinguir tres configuraciones básicas, que se muestran a continuación :

- **HIGH DUST.**

Es la disposición más utilizada en la práctica, ya que el reactor catalítico se coloca inmediatamente después de la salida del equipo de combustión, con lo que se puede aprovechar la alta temperatura de los gases y trabajar en condiciones próximas al punto de óptimo rendimiento (300-400 C).

Presenta como desventaja de producirse deposiciones de sulfato de amonio (si los gases contienen SO<sub>2</sub>) en las partes frías del reactor, y la necesidad de utilizar catalizadores con gran apertura de canal para evitar deposiciones de partículas (caso de que sean arrastradas por los gases).

- **LOW DUST**

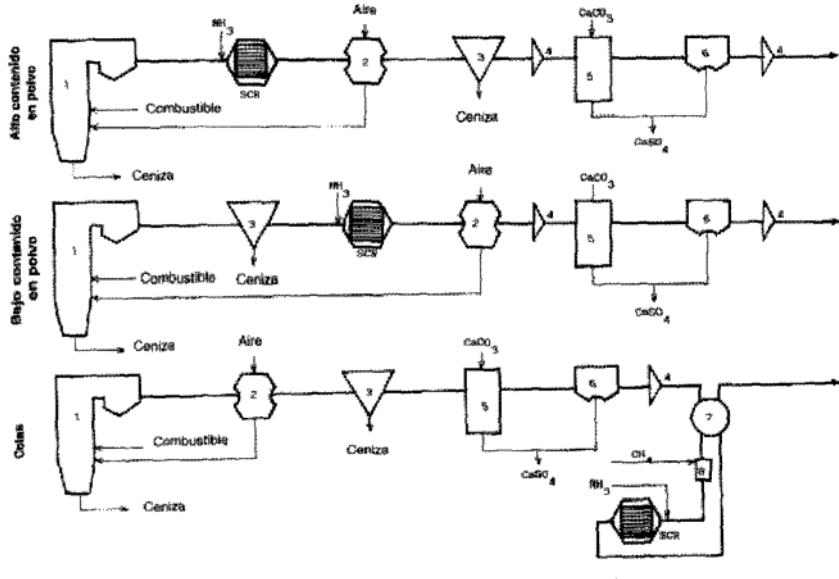
En esta disposición se evitan los problemas asociados a las partículas, pero se tiene el inconveniente de requerir sistemas de desempolvado aptos para trabajar a altas temperaturas.

- **TAIL END**

En esta disposición, el reactor catalítico se coloca al final de la línea de tratamiento, por lo que los gases estarán esencialmente libres de partículas y SO<sub>2</sub>, y podrá trabajarse con catalizadores de poca apertura de canal y composición distinta pues no existe el problema de la oxidación del SO<sub>2</sub>.

Las dimensiones del catalizador también son más pequeñas, pero se tiene el inconveniente de que a la salida de la desulfuración las temperaturas suelen ser inferiores a 100 C, por lo que es necesario un sistema de recalentamiento.





- |                                  |                                 |                              |
|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1 - Caldera                      | 4 - Ventiladores y/o soplantes. | 6 - Filtros                  |
| 2 - Pre calentador               | 5 - DeSOx                       | 7 - Intercambiador.          |
| 3 - Precipitador electrostático. |                                 | 8 - Quemador de gas natural. |



### 7.3.-COMPARACION ENTRE SISTEMAS

Los sistemas de depuración de gases y partículas citados anteriormente no son específicos para un determinado contaminante, sino que actúan con eficacia variable sobre un gran número de sustancias.

La eficacia de depuración constituirá el parámetro básico para la selección (véanse en las figuras adjuntas una comparación entre distintos sistemas)

La elección definitiva, entre ellos, sin embargo, no sólo debe estar basada en la eficacia relativa de captación sino debe considerar aspectos como : seguridad, residuos generados, necesidades previas de acondicionamiento etc.

Así, en el cuadro siguiente se muestra una valoración de la diferente aplicabilidad de los depuradores de partículas :

ASPECTO	CICLONES	LAVADORES	MANGAS	ELECTROST
Partículas gruesas	X			
Partículas finas		X	X	X
Recuperación de material	X		X	X
Gases combustibles	X	X	'=	
Volúmenes altos	X			X
Volúmenes bajos			X	
Temperaturas altas	X	=		
Depuración del gas		X		

En última instancia, el responsable del proyecto seleccionará la solución óptima después de comparar distintas propuestas de los suministradores.

Para ello deberá disponer de información suficiente acerca del efluente a depurar para que la solución estudiada sea pertinente.

Algunos de estos datos procederán del proyecto de cogeneración, otros deberán obtenerse a partir de cálculos, y otros, por último deberán estimarse o medirse en otras instalaciones de similares características.



DISPOSITIVOS DEPURADORES	CONTAMINANTE	TAMAÑO CÉPTIMO DE LAS PARTÍCULAS (m)	RENDIMIENTO %	REQUERIMIENTOS DE MATERIAS NECESARIAS ENERGIA AGUA VAPORES COMBUSTIBLE	CONTAMINANTE RETENIDO COMO RESIDUO	OBSERVACIONES
<b>CAPTADORES MECANICOS</b>	↑ AEROSOL ↓	> 50	< 50	X	Polvo seco	(Ídem como precipitadores baratos.
-Canales de sedimentación		5-25	50-90	X	"	
-Ciclones		> 10	< 80	X	"	
-Precipitadores dinámicos		> 1	> 80	X	"	
-Captadores por choque		< 1	> 99	X	"	
<b>FILTROS DE MANGAS</b>		< 1	> 99	X		(Mangas sensibles a T, humedad y velocidad de filtrado)
<b>DEPURADORES POR VIA HUMEDA</b>						
-Torres de pulverización		25	< 80	X X	Líquido	-Es necesario tratamiento del residuo final líquido.
-Ciclones		5	< 80	X X	"	-Posible obstrucción y generación de partículas visibles.
-Choque		5	< 80	X X	"	(1)
-Efecto Venturi		< 1	< 99	X X	"	
<b>PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS</b>		< 1	95-99	X	Polvo seco ó húmedo	Sensible a condiciones de funcionamiento y caract. de las partículas.
" SONICOS				X	"	
<b>LAVADORES DE GASES</b>			> 90	X X	Líquido	Caro (1)
<b>ABSORBEDORES DE GASES</b>			> 97	X X	Sólido ó líquido	Necesidad de retirar el absorbente.
<b>INCINERADORES DIRECTOS</b>	↓ GASES		> 98	X X	CO <sub>2</sub>	→ Puede resultar caro.
<b>INCINERADORES CATALITICOS</b>			> 98	X X	CO <sub>2</sub>	→ Riesgo de envenenamiento del catalizador

Entre los datos básicos que deberán de suministrarse al proveedor o la ingeniería se encuentran :

- Perfil de funcionamiento horario, diario, semanal, anual.
- Caudal de gases.
- Temperatura media y máxima de los gases.
- Presión de los gases a la salida del equipo.
- Concentración de contaminante y peso emitido anualmente.
- Humedad relativa.
- Concentración de partículas y azufre.
- Presencia de gases condensables, inflamables o corrosivos.
- Disponibilidad de espacio.
- Ubicación y altura de la chimenea.

#### 7.4.-OFERTA COMERCIAL DE EQUIPOS DE DEPURACION

En el cuadro siguiente se muestran algunos suministradores españoles de equipos de depuración :

NOMBRE	AREA	CIUDAD
AAF SA-GRUPO SNYDERGENERAL	SCRUBBERS,MULTICICLONES,MANGAS, Y OTROS	VITORIA
ACUANET SA	LAVADORES	MADRID
AGREGADOS INDUSTRIALES SA	DESULFURACION, DENOX	MADRID
AMERICAN AIR FILTER	FILTRACION	VITORIA
ANINGAS SA	ADSORCION CARBON ACTIVO	BARCELONA
A. CAÑAS S.L.	LAVADO DE GASES	SABADELL,BARNA
BABCOCK WILCOX ESPAÑOLA SA	INCINERACION.INGENIERIA	BILBAO
CAMPI Y JOVE SA	ADSORCION CARBON ACTIVO	MADRID
DEFISA	CICLONES,MANGAS,LAVADORES,ABSORCION DE GASES	MADRID
ECOTEC	ABSORCION,CAPTACION POLVO,OXIDACION TERMICA Y CATALITICA	BARCELONA
FIVEMASA	INGENIERIA	BILBAO
F.L.SMITH ESPAÑOLA SA		LAS ROZAS,MADRID
GREENWICH TECHNOLOGY SA	INGENIERIA.INCINERACION	BARCELONA
HEINRICH LUEHR ESPAÑOLA SA	FILTRACION Y ACONDICIONAMIENTO	BILBAO
IBERCLEAN SA	FILTRACION	PRAT DE LLOBR,BARNA
INDUSTRIAS GOINI SA	FILTRACION	VITORIA
KALFRISA	INCINERACION	ZARAGOZA
MOYVEN SL	FILTRACION Y LAVADO DE GASES	GUIPUZCOA
NEU AERODINAMICA SA	TRAT GASES COMBUSTION.FILTRACION	MADRID
PLASTOQUIMICA S.L.	FILTRACION.ABSORCION	S.J.ESPI,BARNA
QUIMYTROL SYSTEMS SL	ABSORCION.DENOX.INCINERACION	MADRID
RECOVERY SA	INCINERACION	BARCELONA
SALIVENT S.L.	INGENIERIA	BILBAO
TECOPLAS S.L.	LAVADO DE GASES	ALONSOTEGUI,VIZCAYA
THYSSEN MEDIO AMBIENTE SA	INCINERACION	SS REYES,MADRID
WESSEL	INGENIERIA DEPURACION DE GASES Y OLORES	CUARTE, ZARAGOZA
W.L.GORE Y ASS SARL	FILTRACION.INCINERACION	S J ESPI,BARCELONA

## 8.-BIBLIOGRAFIA

### 8.1.-TEXTOS

1. Reducción catalítica selectiva de los NOx con amoníaco. Alemany, Delgado, Blasco y Svachula. IQ Marzo 1995.
2. Depuración de gases en incineradoras de residuos. Sanchez y Herranz. IQ Junio 95
3. Desulfuración de gases de combustión. Magnin. IQ Mayo 1996
4. Automática e Instrumentación. 1992.
5. Aspectos Medioambientales de la Cogeneración con gas. ICAEN. 1995. (Basado en un estudio de Gas de Euzkadi)
6. Atmospheric Emission Inventory Guidebook. Emep-Corinair. Ed. Gordon McInnes. European Environment Agency. 1996
7. Air pollution, its origin and control. Wark&Wanner. Ed. Harper&Row.1989
8. Air pollution engineering manual. Buonicore&Davis. Ed. Van Nostrand Reinhold.1992
9. Fibras para filtros de gases. Sanchez Martín, Jaraiz y Estevez. Universidad de Salamanca. 1995
10. Filtros electrostáticos para plantas industriales. Aage Jensen y Brime. DL Smidth Española SA. 1991
11. El proceso de combustión y sus efectos sobre el medio natural. Carnicer, JM. Comisión Nacional de la Energía de Chile. Inedito.
12. Manual para el Diseño y Ejecución de Proyectos de Control de Emisiones Industriales. CENERGIA-NNUU (PER 92/G31 Projeet Energy Environnement).
13. "Atmospheric Difussion". Pasquill, F. and Smith, F.B. Ellis Horwood (John Wiley & Sons). Chischester, New York .1 1983.
14. Manual de Cálculo de Chimeneas Industriales. Ministerio de Industria y Energía.1981.
15. Centrales Termoeléctricas. V.Ya Rizhkin. Mir 1979.
16. Flame And Combustion, Barnard And Bradley, Ed. Chapman And Hall, 1985.
17. Coal Conversion, E.J. Hoffman, Ed. Hoffman, 1977
18. Manual Practico de Ahorro Energetico, Renfe. 1988
19. Tecnicas de Ahorro Energetico En La Industria, Instituto Para La Diversificación Y Ahorro Energético, 1986
20. Manual de Calculo De Chimeneas Industriales, M° de Industria y Energía 1984.
21. Mapa Eolico Nacional
22. Tablas de Radiación Solar y Datos Climatológicos, UNISOLAR, Instituto Metereologico Nacional, 1980
23. Curso de Energía Eolica-Estado Actual y Perspectivas De Futuro, Catedra De Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia 1983.
24. Vent et Performances des Eoliennes, Editions SMC, Paris, Justus C.G., 1980
25. Contaminacion del Aire por La Industria, Albert Parker, Ed. Reverté, 1983.
26. Uso Eficiente de la Energia en Calderas y Redes de Fluidos, Idae, 1988
27. Medida de la Contaminación Atmosférica, E. Muñoz, M. Paz y Otros, Ingeniería Química, Septiembre 1986.
28. Epa Reference Methods, Environmental Protection Agency, 1983, Usa Y Modificaciones.
29. Manual de Biomasa. Cuadernos de Energías renovables. IDAE.1992 Los biocombustibles líquidos. CIEMAT. Sermasa.1995. Calefacción geotérmica. Sanchez Guzman, José. Energías Alternativas. Energía, Medio Ambiente y Edificación. Steadman, Philip. H.Blume.1982.

30. Curso básico de instaladores de energía solar. Clima y Ambiente. 1982.
31. Uso Directo de la Energía Solar. Farrington Daniels. H. Blume. 1982 Energía solar. Manual de Instalaciones Térmicas. Minguella, J.A. y Torrens. Ed Copress. 1982
32. Producción de electricidad con energías renovables. CIEMAT-IER. Madrid. 1996.
33. Biocombustibles: presente y futuro. Caserta, G. IDAE. 1993
34. La energía solar. Aplicaciones prácticas. Censolar. 1993
35. Manual de Instalaciones de Energía solar fotovoltaica. Alcor, E. 1985
36. Principios de conversión de energía eólica. CIEMAT-IER. 1995
37. La energía del mar, energía mareomotriz. Jarabo Friedrich, Francisco y otros. Energías Alternativas.
38. Manual de Minicentrales Hidroeléctricas. Cuadernos de Energías renovables. IDAE. 1992
39. Energie eolienne. Les gourieres, Desiré. Ed. Eyrolles. 1980
40. Procesos térmicos en energía solar. Duffie, John A. y Beckman. Ed. Grupo Cero



eoi