

Contaminación atmosférica. Técnicas de muestreo en Emisión.

Master en Ingeniería y Gestión
Medioambiental

2015/16

PROFESOR

Jesús Rubio Flamarique



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	2
2. CONCEPTOS.....	2
3.- EMISIÓN DE CONTAMINANTES. SISTEMAS DE MEDICIÓN.....	5
3.1. Tipos de contaminantes.....	6
3.2. Tipos de emisiones.....	6
3.3. Tipos de muestreos.....	9
4. DETERMINACIÓN DE GASES.....	10
4.1. Métodos extractivos.....	11
4.1.1.- Toma de muestra manual instantánea.....	11
4.1.2.- Toma de muestra manual acumulativa.....	13
4.1.3.- Toma de muestra y técnica instrumental.....	15
4.2.- Métodos no extractivos.....	17
4.2.1.- Métodos instrumentales en chimenea.....	17
4.2.2.- Método de medida a distancia.....	17
5.- DETERMINACIÓN DE PARTÍCULAS.....	18
5.1.- Métodos extractivos.....	18
5.1.1.- Métodos extractivos manuales.....	18
5.1.2.- Métodos extractivos instrumentales.....	18
5.2.- Métodos no extractivos.....	20
5.2.1.- Métodos no extractivos instrumentales.....	20
5.2.2.- Métodos de medida a distancia.....	20
5.3.- Integración de los sistemas de medición.....	20
6.- DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS.....	21
6.1.- Introducción.....	21
6.2.- Muestreo de partículas. Muestreo isocinético.....	24
6.2.1.- Características del punto de muestreo.....	24
6.2.2.- Determinación de la velocidad.....	25
6.2.3.- Cálculo del peso molecular del gas de chimenea.....	26
6.2.4.- Cálculo del número de puntos transversales necesarios para la determinación de velocidad.....	29
6.2.5.- Elección de la boquilla de la sonda.....	32
6.2.6.- Muestreo isocinético. Cálculo del número de puntos transversales necesarios.....	34
6.2.7.- Cálculo del porcentaje de isocinetismo.....	34
6.2.8.- Cálculo del volumen muestreado.....	35
6.2.9.- Cálculo de la concentración de contaminantes en los gases de emisión.....	36
6.2.10.- Corrección de la concentración de un contaminante.....	36
6.2.11.- Cálculo del caudal de gases.....	37
6.2.12.- Cálculo de la cantidad de contaminantes emitidos.....	37
7.- CASO PRÁCTICO.....	38

1.- INTRODUCCIÓN.

Vamos a entender por Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica, la medición de la concentración de los contaminantes presentes en el aire (calidad del aire) y de la concentración emitida a la atmósfera por los distintos procesos industriales.

Con esta vigilancia se pretende relacionar las concentraciones medidas con los efectos que se pueden producir sobre el hombre, seres vivos, recursos naturales y bienes materiales. Una vez identificadas estas concentraciones, las mediciones nos van a proporcionar una información básica que va a permitir la toma de decisiones a distintos niveles para evitar que se produzcan situaciones de riesgo y mejorar en la medida de lo posible la calidad del aire en general.

Con la vigilancia y control de las emisiones se van a conocer como contribuyen los distintos procesos industriales a la presencia de los contaminantes en el ambiente que respiramos, a la vez que nos permite el control de los procesos y la introducción de modificaciones en los mismos.

2. CONCEPTOS.

Se denomina contaminación atmosférica a la presencia en el aire de sustancias o formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgo, daño o molestia grave a las personas y bienes de cualquier naturaleza.

La contaminación de la atmósfera producida por acción del hombre comienza por la emisión de contaminantes a la misma. Así, en general, se entiende por emisión la totalidad de sustancias que pasan a la atmósfera después de dejar las fuentes que las originan.

La emisión puede clasificarse en:

Emisión primaria (Lanzamiento directo de contaminantes a la atmósfera):

Procedente de focos localizados (fijo o móvil).

Procedente de focos no localizados (emisiones erráticas o difusas).

Emisión secundaria:

Son los contaminantes de la atmósfera que se generan por reacciones químicas a partir de los contaminantes primarios. Estas reacciones generalmente se inician con un proceso fotoquímico.

Simultáneamente a la formación de los contaminantes secundarios, se van produciendo fenómenos de mezcla, dilución y transporte de los contaminantes cuyo resultado es la presencia de contaminantes en lugares distintos a donde se han generado.

De esta forma, aparece el concepto de **inmisión**, que según la O.M de 18 de Octubre de 1976, se define como la presencia de contaminantes en la atmósfera a nivel del suelo, de modo temporal o permanente.

Un punto clave de la contaminación atmosférica es la vigilancia de la concentración de los distintos contaminantes en la atmósfera a nivel del suelo para que no alcance unos determinados valores, que a priori, en función de la experiencia y estudios realizados se consideran perjudiciales o limitantes para la salud humana, resto de seres vivos, recursos materiales y del medio ambiente en general.

De esta forma nace el concepto de **nivel de inmisión**, que según la O.M de 18 de Octubre de 1976 se define como la cantidad de contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos por unidad de volumen de aire, existente entre cero y dos metros de altura sobre el suelo.

La vigilancia de los niveles de inmisión permite conocer si se puede producir algún riesgo para la salud humana y medio ambiente en general.

Como los niveles de inmisión tienen su origen en las emisiones, la forma más común de mantener unos adecuados niveles de inmisión es controlar los niveles de emisión. Se entiende por nivel de emisión, según la O.M. 18 de Octubre de 1976 la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera por un foco fijo o móvil, medido en una unidad de tiempo, normalmente se expresa en Kg/h, Tm/año, etc.

De esta forma, para que no se produzcan episodios de contaminación atmosférica, la legislación al respecto de la mayoría de los países prefija unos niveles máximos permitidos para los niveles de emisión e inmisión.

Así, la legislación española (D. 833/75 y demás normas que regulan las emisiones de los procesos industriales y calidad del aire) pretenden controlar los niveles de emisión e inmisión estableciendo unos límites en concentración en el gas emisión o en el aire.

La concentración de los contaminantes presentes en el aire o en las emisiones se expresa por medio de las unidades de masa en las unidades de volumen más usuales, es decir, mg/m^3 , $\mu\text{g/m}^3$, ng/m^3 , mg/Nm^3 , $\mu\text{g/Nm}^3$, ng/Nm^3 ¹, ppmv, ppbv, etc.

3.- EMISIÓN DE CONTAMINANTES. SISTEMAS DE MEDICIÓN.

Las mediciones de los niveles de emisión se realizan fundamentalmente para determinar el cumplimiento de la legislación, y de esta forma, normalmente se asegura que los límites de inmisión permanecen en valores que no pueden producir daños a la salud humana, otros seres vivos y medio ambiente en general. De forma más particular, y relacionados con este objetivo, las mediciones sirven para:

- Realizar los autocontroles de la propia industria.
- Obtención de datos para la elección y diseño de un equipo de depuración adecuado.
- Determinación del rendimiento de los equipos de depuración instalados para la reducción de emisiones.
- Determinación de factores de emisión a fin de utilizarlos posteriormente en inventarios de emisiones.
- Seguimiento de la evolución de las emisiones producidas por los cambios en los procesos productivos y/o en los equipos correctores.
- Obtención de datos para su introducción como parámetros de entrada de modelos de dispersión.
- Establecimiento de datos que permitan legislar.

¹ Nm^3 significa un metro cúbico expresado en condiciones normales, es decir 1 atm de presión y 0 °C.

Para transformar ppm en mg/Nm^3 se utiliza la siguiente expresión: $\text{mg/Nm}^3 = \text{ppmv} \cdot P_m / 22,4$, donde P_m es el peso molecular del contaminante gaseoso cuantificado.

3.1. Tipos de contaminantes.

Desde el punto de vista de la medición de los contaminantes, es muy importante tener en cuenta el estado físico en el que se presentan, según este criterio, los contaminantes se pueden clasificar de forma sencilla en:

- Partículas:
 - Partículas sedimentables. Tamaño diámetro $> 10 \mu\text{m}$.
 - Partículas en suspensión. Tamaño diámetro $0,1 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$.
 - Humos de combustión. Partículas de naturaleza carbonosa, generadas normalmente en procesos de combustión incompleta de hidrocarburos.
- Gases (a presión y temperatura ambiente).
- Contaminantes asociados a partículas sólidas.
- Contaminantes que se encuentran asociados a partículas líquidas o que condensan fácilmente.

3.2. Tipos de emisiones.

Según la forma en que se realiza la emisión, éstas pueden ser:

- Emisiones constantes y uniformes.
- Emisiones constantes pero no uniformes.
- Emisiones no constantes y uniformes.
- Emisiones no constantes ni uniformes.

Se definen las emisiones como constantes, cuando no existe una variación en el tiempo del caudal de gases ni de la concentración de contaminantes. En una emisión no constante se produce una variación del caudal o de la concentración de contaminantes o de ambas cosas a la vez.

Se dice que una emisión es uniforme, cuando no existe variación de concentración del contaminante en distintos puntos de la sección de muestreo.

A continuación, en función de los tipos de emisiones citadas, se recomiendan una serie de tipos de muestreo.

Emisiones constantes y uniformes:

Tanto el caudal como la concentración permanecen constantes en relación al tiempo y son uniformes a través de toda la sección del conducto o chimenea.

En estas condiciones una sola medida de caudal (velocidad de emisión) y una sola muestra son suficientes para caracterizar la emisión.

El muestreo y la correspondiente medida de velocidad, pueden efectuarse en cualquier punto de la sección del conducto, y no importa el momento en que se realice.

Emisiones constantes pero no uniformes:

La velocidad y la concentración son constantes en relación al tiempo, pero la distribución de contaminantes varía en puntos distintos de la sección de la chimenea.

En este caso se han de realizar una serie de medidas que, independientemente del momento en que se realicen, darán lugar a datos representativos.

La sección transversal se dividirá en secciones más pequeñas de igual área, cuyo número coincidirá con el de las medidas a efectuar. Las muestras se extraerán del centro de cada área elemental, muestreando en cada punto durante el mismo período de tiempo.

Emisiones no constantes y uniformes:

El caudal (la velocidad) y la concentración varían con el tiempo, pero la distribución espacial de los contaminantes a través de la sección de la chimenea es constante.

Cuando se dan estas condiciones, por lo general es suficiente hacer la toma de muestras en un sólo punto dentro de la sección transversal de muestreo, no importa dónde esté localizado.

En función de los objetivos perseguidos se determinará el periodo de medición y la duración del mismo.

Emisiones no constantes y no uniformes:

Tanto el caudal como la concentración varían con el tiempo y no son uniformes a lo largo de la sección de la chimenea. En estas condiciones se han de realizar muestras compuestas en distintos periodos. Las muestras compuestas se realizan a partir de muestras simples tomadas en puntos diferentes de la sección de muestreo.

En inspecciones para declarar conformidad con respecto a la legislación, hay que compatibilizar estas consideraciones con el requerimiento de la legislación española de realizar un mínimo de tres medidas, de una hora de duración cada una, a lo largo de un periodo de 8 horas (Orden Ministerial 18 de Octubre de 1976).

3.3. Tipos de muestreos.

Se pueden distinguir los siguientes tipos de muestreo en función de cómo se realice la extracción de la muestra:

Muestreo a caudal constante.

Es aquel en el cual se fija un determinado caudal de toma de muestra y se mantiene durante todo el muestreo. El caudal se elige en función del contaminante a muestrear, tipo de emisión, cantidad de elemento de retención, concentración de contaminante esperado y tiempo de muestreo. Se utilizan normalmente en muestreos de gases y en emisiones constantes.

Muestreo proporcional.

Es aquel en que el caudal de toma de muestra se ajusta de manera que se mantenga proporcional al caudal del gas emitido por la chimenea. Para establecer el caudal de muestreo, además de las consideraciones del muestreo a caudal constante hay que tener en cuenta el caudal de emisión. Se utilizan para muestreos de gases y en emisiones no constantes.

Muestreo puntual.

En este caso se toma una muestra individual durante un período corto de tiempo. Para un estudio representativo son necesarias múltiples y frecuentes muestras. La ventaja que presenta este método es que proporciona variaciones de concentración en el tiempo o lo largo del conducto o chimenea.

Muestreo de partículas.

En todo caso, para la obtención de muestras representativas de partículas sólidas o líquidas la muestra ha de ser tomada en condiciones isocinéticas, es decir que la velocidad en la boquilla de aspiración es la misma que la velocidad de los gases de la chimenea en el punto de muestreo.

4. DETERMINACIÓN DE GASES.

Existen distintos métodos válidos para determinación de los contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera.

- Métodos extractivos:

- Toma de muestra manual instantánea.
- Toma de muestra manual acumulativa.
- Toma de muestra y técnica instrumental.

- Método no extractivo.

La elección de una u otra técnica dependerá del objetivo que se pretende con la medida, tipo de contaminante, su origen y orden de concentración, así como las posibles sustancias que puedan interferir en la determinación.

4.1. Métodos extractivos.

Son aquellos métodos que aspiran la muestra fuera del foco de emisión, haciéndola pasar a continuación por un medio colector o por un instrumento de medida.

4.1.1.- Toma de muestra manual instantánea.

Se realizan de forma puntual en un intervalo de tiempo muy corto, con lo que se obtienen volúmenes de muestra muy limitados.

Con técnica analítica de laboratorio:

La muestra se recoge directamente en unos recipientes que pueden ser de distintos materiales y posteriormente son analizadas en el laboratorio. Los recipientes pueden tener o no, sustancias con las que los contaminantes puedan reaccionar.

Un ejemplo de este tipo de muestreo son las muestras tomadas en bolsas de teflón. Este material es muy adecuado a este tipo de muestreos por ser inerte (no reacciona con la muestra ni tampoco adsorbe los componentes de la misma).

Sin técnica analítica de laboratorio (Tubos de reacción):

Son tubos, generalmente de vidrio que contienen sustancias que reaccionan específicamente con el contaminante que se pretende medir. La reacción genera una indicación de color proporcional a la concentración del contaminante presente en el gas de emisión. La longitud del material coloreado es una medida semicuantitativa de la concentración, de forma que ésta se puede cuantificar gracias a una escala graduada marcada sobre la parte exterior del tubo.

Existen tubos para determinar gran cantidad de sustancias. Para cada sustancia pueden existir distintos intervalos de medida.

Algunos de estos tubos responden a más de un contaminante, por lo que es necesario conocer las posibles interferencias, éstas son generalmente indicadas por el fabricante. Dependiendo del tipo de tubo y contaminante a determinar es necesario pasar más o menos volumen de muestra (normalmente con una bomba manual de aspiración). La vida de estos tubos es limitada por lo que para una correcta determinación es necesario tener en cuenta la fecha de caducidad.

Es una medida semicuantitativa, por lo que su uso más indicado es de chequeo, de forma que una vez detectada la presencia de un contaminante y el rango de concentración en el que se encuentra, planificar un muestreo por un método más específico y con una mayor duración.

4.1.2.- Toma de muestra manual acumulativa.

Se recoge un volumen grande de muestra, durante un tiempo también elevado. La muestra pasa a través de un recipiente en el que existe alguna sustancia capaz de retener al contaminante que se desea analizar. Según el fenómeno físico-químico que tenga lugar entre el contaminante y la sustancia podemos tener los siguientes métodos.

Métodos de absorción.

Son de los más utilizados en la recogida de muestras gaseosas. El gas se hace pasar a través de un absorbente que retiene el contaminante por disolución o por reacción química, dando lugar a cambios físicos o a la formación de compuestos que posteriormente pueden ser determinados mediante técnicas analíticas de laboratorio.

En este tipo de muestreo es fundamental tener en cuenta los siguientes factores que determinarán la calidad del mismo: Temperatura de la muestra, caudal de aspiración (velocidad de paso del contaminante a retener en el absorbente), volumen del absorbente y tiempo de muestreo.

Métodos de adsorción.

La retención del contaminante se produce sobre sustancias sólidas como por ejemplo alúmina activada, gel de sílice (compuestos orgánicos polares), resinas, carbón activo (compuestos orgánicos apolares), etc.

Después del muestreo, el recipiente que contiene el adsorbente se lleva al laboratorio y el contaminante se determina posteriormente por pesada o más comúnmente por análisis químico después de realizar su desorción.

Al igual que en el método de absorción, la temperatura del gas a su paso por el adsorbente, el caudal de aspiración (velocidad de paso), la cantidad de adsorbente y el tiempo de muestreo son factores muy importantes a tener en cuenta para planificar el muestreo.

Este procedimiento se utiliza para algunos compuestos orgánicos en pequeñas concentraciones. La desorción se realiza normalmente utilizando un disolvente adecuado, por ejemplo, disulfuro de carbono para adsorbentes como el carbón activo o bien desorción térmica para adsorbentes como el tenax, etc.

Métodos de condensación y congelación.

La muestra se pasa a través de una serie de recipientes en los que va disminuyendo progresivamente la temperatura, quedando retenidos por condensación los compuestos a determinar. Los gases y vapores se conservan inalterados y sin sufrir reacción química para más tarde ser analizados en el laboratorio. Se utiliza para algunos compuestos orgánicos en concentración muy pequeña. Es necesario eliminar previamente las partículas y otras sustancias como el agua que, al congelarse obturarían los conductos de aspiración.

Como tal, se utilizan menos que los anteriores. Pero casi siempre los muestreos por absorción y adsorción se ayudan de procedimientos de enfriamiento para aumentar el rendimiento de la retención.

4.1.3.- Toma de muestra y técnica instrumental.

El gas se extrae de la chimenea determinándose la concentración del contaminante en tiempo real mediante técnicas automáticas.

Equipos instalados a pie de chimenea.

Para una correcta determinación, el gas muestreado debe ser transportado desde el punto de toma de muestra al punto de cuantificación sin que sufra modificación alguna. Para ello, normalmente el transporte se realiza a través de conductos inertes, principalmente de teflón, que van calorifugados a la misma temperatura que la emisión. Los tubos de transporte están protegidos del exterior (frío, calor, radiación solar, alteraciones mecánicas, etc.) mediante camisas metálicas y plásticas de gran resistencia.

Los problemas derivados del transporte se evitan o minimizan realizando las medidas lo más cerca posible del foco emisor.

Normalmente el gas antes de entrar en la cámara de cuantificación debe de sufrir pequeños acondicionamientos, fundamentalmente una filtración para eliminar las partículas en suspensión. Por otro lado, el equipo debe ser hermético y estar fabricado en materiales no reactivos y no corrosivos.

La calibración debe realizarse en condiciones similares a la cuantificación, es decir los gases patrones se deben exponer a las mismas condiciones que la muestra.

Se han desarrollado equipos que determinan la concentración de distintos compuestos por la absorción que sufre una luz de determinada longitud de onda al pasar por una muestra del gas. Estos equipos se basan en la absorción de una luz en infrarrojo no dispersivo, ultravioleta etc.

En algunas ocasiones se utilizan los mismos equipos que los utilizados en inmisión, realizando las oportunas diluciones del gas de emisión. Las diluciones se tienen en cuenta a la hora de obtener la concentración final de la muestra.

Estos equipos tienen un elevado coste inicial y de mantenimiento. Para un funcionamiento adecuado necesitan unas condiciones ambientales constantes y controladas (temperatura, humedad, ausencia de vibraciones, etc).

Equipos portátiles.

Se utilizan para efectuar análisis de forma similar a los equipos anteriores pero sin estar instalados de forma fija. Utilizan distintas técnicas, en algunos casos similares a las ya descritas en el punto anterior, en todo caso dependen del contaminante a medir y de su concentración.

Unos de los más comunes y sencillos son los que utilizan células electroquímicas.

4.2.- Métodos no extractivos.

4.2.1.- Métodos instrumentales en chimenea.

Las técnicas instrumentales de análisis pueden ser adaptadas al foco de emisión, teniendo las precauciones necesarias para facilitar el mantenimiento y observación de los equipos.

La determinación del contaminante se realiza directamente sobre el foco de emisión si necesidad de realizar la extracción ni acondicionamiento de la muestra.

Estos equipos utilizan generalmente técnicas ópticas y electrónicas de análisis. Se hace atravesar una señal luminosa de características determinadas a través del conducto, la señal sufre una modificación al entrar en contacto con el gas contaminante. Esta modificación es captada por un detector situado en el extremo opuesto del diámetro y traducida electrónicamente a unidades de concentración.

4.2.2.- Método de medida a distancia.

La medida se realiza normalmente sobre el penacho una vez que ha salido de la chimenea, cerca de la boca de la misma. Las técnicas de medida a distancia son básicamente las mismas que las instrumentales. La diferencia fundamental es que en este tipo de medidas los equipos se encuentran localizados fuera de las chimeneas que se pretenden muestrear.

5.- DETERMINACIÓN DE PARTÍCULAS.

5.1.- Métodos extractivos.

5.1.1.- Métodos extractivos manuales.

Las partículas son extraídas de la chimenea mediante un equipo de muestreo, quedando recogidas en un filtro, impactadores de cascada o en otro sistema adecuado (por ejemplo ciclones, estos equipos retienen las partículas provocando un cambio brusco en la velocidad y dirección de la corriente gaseosa).

La muestra debe ser extraída isocinéticamente. Es decir a la misma velocidad que la de salida por la chimenea.

5.1.2.- Métodos extractivos instrumentales.

La muestra se extrae y se analiza fuera de la chimenea. Pueden ser:

Atenuación de radiación β .

Se basan en medir la disminución de la intensidad que sufre una radiación emitida por una fuente de baja actividad, al atravesar un filtro, antes y después de ser depositada sobre su superficie una muestra de partículas extraída de la chimenea.

Ópticos electrónicos.

Se basan en medir la disminución de la intensidad de la luz que atraviesa un cristal, sometido a los humos de la chimenea durante un período de tiempo determinado, antes y después de su limpieza.

Ópticos visuales.

La medida de emisión partículas cuando estas provienen exclusivamente de proceso de combustión (humos de combustión) se pueden realizar por comparación visual de la muestra con una escala arbitraria preestablecida. Existen dos sistemas diferentes:

Escala Ringelmann.

Consiste en 6 patrones de comparación que van desde el blanco total al negro absoluto. Están realizados trazando sobre una cartulina, rejillas en color negro que ocupan el 0, 20, 40, 60, 80 y 100 % de la superficie. El color de la emisión se compara visualmente de forma repetida con los diversos patrones. Los resultados se promedian, de forma que al final se obtiene un resultado expresado en unidades Ringelmann o en porcentaje.

Escala Bacharach.

Esta posee 10 patrones distintos, numerados del 0 al 9. El número de identificación se corresponde con una reducción de la luz incidente del 10 %. El aparato empleado para la toma de muestras es una especie de bomba de aspiración, que succiona los gases, pasando éstos a través de un papel de filtro colocado transversalmente, sobre el que

se forma una mancha que posteriormente se compara con la escala de patrones, obteniéndose el resultado por similitud de la mancha.

5.2.- Métodos no extractivos.

5.2.1.- Métodos no extractivos instrumentales.

Son métodos instrumentales. Uno de los más empleados en la actualidad es el método de luz difusa. En el proceso de luz difusa, la luz modulada, procedente de una lámpara halógena, se convierte en un haz cónico de luz mediante un sistema óptico de emisión. Este haz ilumina las partículas en la chimenea. La luz difusa reflejada por estas partículas será registrada por un sistema óptico de recepción dentro de un volumen de medición establecido y se transmite al sensor óptico. Este sensor convierte la luz difusa en señal proporcional a la intensidad de la luz. La intensidad de la luz difusa es proporcional a la concentración de partículas en la chimenea.

5.2.2.- Métodos de medida a distancia.

La medida se realiza sobre el penacho una vez fuera del conducto de emisión. Se basan en medir la atenuación sufrida por un impulso de luz láser que se hace incidir sobre la pluma del penacho (LIDAR). Estos equipos permiten realizar un seguimiento de la evolución del penacho. Los equipos son voluminosos, caros, complicados y requieren de personal especializado para interpretar y efectuar las medidas.

5.3.- Integración de los sistemas de medición.

Dependiendo de la entidad del foco y actividad industrial objeto de las mediciones, legislación aplicable, objetivos perseguidos, sensibilidad del entorno etc., es común la integración de mediciones periódicas con equipos portátiles –manuales o automáticos- (normalmente utilizadas por las Entidades de Inspección) y las técnicas de medida en continuo fijas (implantadas en la propia actividad industrial).

Igualmente cada vez es más frecuente que los datos obtenidos en las mediciones periódicas y sobretodo por los equipos de medición en continuo en Emisión se reciban en los centros de control de la actividad junto con otros proporcionados por equipos de medición en Inmisión y meteorológicos, de forma que permita evaluar la incidencia de la actividad sobre el medio ambiente atmosférico de una forma más conjunta.

Con un mayor alcance, cada vez más Administraciones públicas (C.C.A.A), están integrando en tiempo real los datos de emisión de las principales actividades industriales de su ámbito geográfico en su sistema de vigilancia de la contaminación de la atmósfera cara a abordar la problemática de forma más global posible.

6.- DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS.

6.1.- Introducción.

En normativa española no existen métodos legislados con relación a la toma de muestra y análisis de contaminantes en emisión. En la actualidad, para la realización de estas tareas se siguen procedimientos de la Environmental Protection Agency (E.P.A) de los EE.UU, normas ISO y normas EN ó UNE-EN.

Las normas E.P.A describen métodos para la determinación de un mayor número de contaminantes (aunque datan de más tiempo). En relación con la contaminación atmosférica, las normas están recogidos en el Code Federal Regulations 40 Part. 60. En este volumen se describen los métodos de toma de muestra y de análisis para los principales contaminantes emitidos por fuentes fijas. Los métodos que se utilizan normalmente son los métodos de referencia EPA Nº 1 al 30.

Existen normas **ISO** para la determinación de los siguientes parámetros en emisión:

ISO 7934:1989 Stationary source emissions-Determination of the mass concentration of sulfur dioxide-Hydrogen peroxide/barium perchlorate/Thorin method.

ISO 7935:1992 Stationary source emissions-Determination of the mass concentration of sulfur dioxide-Performance characteristics of automated measuring methods.

ISO 9096:1992 Stationary source emissions-Determination of concentration and mass flow rate of particulate material in gas-carrying ducts-Manual gravimetric method.

ISO 10396:1993 Stationary source emissions- Sampling for the automated determination of gas concentrations.

ISO 10397:1993 Stationary source emissions- Determination of asbestos plant emissions- Method by fibre count measurement.

En cuanto a normas **UNE**, están establecidas las siguientes relativas a emisión:

UNE 77209:1989. Emisiones gaseosas. Características de los monitores en continuo para la medida de opacidad.

UNE 77211:1989. Emisiones gaseosas. Características de los monitores en continuo para la medida de NO_x.

UNE 77216:1995. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de dióxido de azufre. Método del peróxido de hidrógeno y /perclorato de Bario/Thorina.

UNE 77218:1996. Emisiones de fuentes estacionarias. Muestreo para la determinación automática de las concentraciones de gas.

UNE 77219:1998. Emisiones de fuentes estacionarias. Medición automática de la concentración másica de partículas . Características de funcionamiento, métodos de ensayo y especificaciones

UNE 77220:1998. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de las mediciones de una planta de asbestos. Método de medición por contaje de fibras.

UNE 77222:1996. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de dióxido de azufre. Características de funcionamiento de los equipos automáticos de medida.

UNE 77223:1997. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración y caudal másico de material particulado en conductos de gases. Método gravimétrico manual.

UNE 77233:1996. Calidad del aire. tratamiento de datos de temperatura presión y humedad.

UNE-EN 1093-3:1996. Seguridad de las máquinas. Valoración de las sustancias peligrosas transportadas por el aire. Parte 3: Tasa de emisión de un contaminante determinado. Método en banco de ensayo utilizando el contaminante real.

UNE-EN 1093-4:1996. Seguridad de las máquinas. Valoración de las sustancias peligrosas transportadas por el aire. Parte 4: Eficacia de captación de un sistema de aspiración. Método del trazador.

UNE-EN 1911:2011. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de cloruros gaseosos expresados como HCl. Método normalizado de referencia.

UNE-EN 1948:2007. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de PCDD/PCDF y PCB similares a dioxinas.

UNE-EN 14385:2004. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la emisión total de As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl y V.

UNE-EN 13211:2001. Emisiones de fuentes estacionarias. Método manual de determinación de la concentración de mercurio gaseoso total.

UNE-EN 14789:2006. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración volumétrica de oxígeno. Método de referencia. Paramagnetismo.

UNE-EN 14790. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación del vapor de agua en conductos.

UNE-EN 14791:2006. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de dióxido de azufre. Método de referencia.

UNE-EN 14792:2006. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de óxidos de nitrógeno (NOx). Método de referencia (quimioluminiscencia).

UNE-EN 15058:2007. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de monóxido de carbono (CO). Método de referencia: espectrometría infrarroja no dispersiva.

UNE-ISO 15713:2007. Emisiones de fuentes estacionarias. Muestreo y determinación de fluoruros gaseosos.

UNE-EN 13284-1:2002. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de partículas a baja concentración. Parte 1: método gravimétrico manual.

UNE-EN 12619:2013. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración de carbono orgánico gaseoso total. Método continuo con detector de ionizador de llama.

6.2.- Muestreo de partículas. Muestreo isocinético.

6.2.1.- Características del punto de muestreo.

Las características de los puntos de muestreo están especificadas en la legislación española a través de la Orden 18 de Octubre de 1976, sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera, ANEXO III. Concretamente, en este Anexo se recogen las condiciones de las instalaciones para mediciones y toma de muestras en chimeneas, situación, disposición, dimensión de conexiones, accesos.

6.2.2.- Determinación de la velocidad.

Para realizar adecuadamente un muestreo isocinético es necesario igualar la velocidad de succión en la boquilla de la sonda a la velocidad de salida de gases, por tanto es fundamental calcular la velocidad de emisión de los gases de la chimenea. Este cálculo se basa en la siguiente expresión:

$$V_s = C_p * \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\rho}}$$

Donde:

V_s = Velocidad de salida de gases por el conducto emisor "chimenea" (m/s)

C_p = Coeficiente del Tubo de Pitot (0,85 para los tubos de pitot tipo S).

g = Aceleración de la gravedad 9,8 m/s².

ΔP = Presión de velocidad o presión dinámica cada punto de muestreo (mm H₂O), es decir aproximadamente en Kg/m².

ρ = Densidad de los gases en Kg/m³.

A partir de esta, se desarrolla la siguiente expresión:

$$V_s = K_p * C_p * \sqrt{\frac{T_s}{P_s * M_s}} * \sqrt{\frac{\sum \Delta P_i}{N}}$$

Donde:

$K_p = 34,97$. Valor obtenido de sustituir g por su valor, de poner el término densidad en función del peso molecular y los demás términos en las unidades mencionadas.

T_s = Temperatura Absoluta media de los gases de la chimenea ($^{\circ}K$). La mide el equipo mediante un termopar que lleva instalado en cabeza de la sonda.

P_s = Presión absoluta de los gases de la chimenea (mm Hg). Es la presión interior del conducto de emisión.

ΔP_i = Presión de velocidad en cada punto de muestreo (mm H_2O). La mide el equipo mediante un tubo de Pitot "S" y un sensor de presión adecuado.

N = Número de puntos de toma de muestra. Este depende de las distancias del orificio de muestreo a las perturbaciones y de las dimensiones (diámetro, largo, ancho etc.) de la chimenea.

M_s = Peso molecular gas de chimenea. (Base húmeda y base seca).

6.2.3.- Cálculo del peso molecular del gas de chimenea.

El peso molecular de los gases se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_S = M_{S,D} \cdot (1 - F_H) + M_W \cdot F_H$$

$M_{S,D}$ = Peso molecular base seca del gas.

F_H = Fracción Húmeda.

M_W = Peso molecular de la Fracción Húmeda, es decir del agua (18).

En los apartados siguientes se indica como se realiza el cálculo de $M_{S,D}$ y F_H .

Cálculo del peso molecular de la base seca.

$$M_A = \frac{Pm\ O_2}{100} (\% O_2) + \frac{Pm\ CO_2}{100} (\% CO_2) + \frac{Pm\ N_2}{100} (\% N_2) + \frac{Pm\ CO}{100} (\% CO) =$$

$$0,32(\% O_2) + 0,44(\% CO_2) + 0,28(100 - \% O_2 - \% CO_2)$$

Los porcentajes de CO_2 , O_2 y CO se determinan comúnmente con analizadores automáticos de combustión.

En el caso de muestreos isocinéticos en procesos donde no exista combustión, esto es, procesos donde intervenga aire ambiente que arrastre partículas en suspensión, etc., (por ejemplo extractores de molinos, salidas de filtro mangas que eliminan emisiones de ambientes pulverulentos etc.), el peso molecular es prácticamente el del aire atmosférico. Por tanto, en este caso, se introduce en el cálculo un valor de 28,84.

Cálculo de la fracción de humedad.

$$F_H = \frac{VOLUMEN\ AGUA(CN)}{(VOLUMEN\ AGUA + VOLUMEN\ GAS)(CN)} = \frac{1,244 * G}{1,244 * G + VOLUMEN\ GAS(CN)} =$$

$$F_H = \frac{G * 1,244}{G * 1,244 + \frac{V_M * P_M * 359,2}{T_M}}$$

G= Agua recogida en los borboteadores (g).

V_M= Volumen de gas seco muestreado a temperatura y presión del medidor de gas seco (m³).

P_M= Presión absoluta del gas en el medidor de gas seco (presión barométrica) (mm Hg).

T_M= Temperatura absoluta del gas en el medidor de gas seco (°K).

Los datos necesarios para el cálculo de esta fracción húmeda se obtienen en el muestreo de humedad (muestreo a caudal constante de 20 l/minuto durante media hora).

6.2.4.- Cálculo del número de puntos transversales necesarios para la determinación de velocidad.

Para el cálculo de la velocidad según 6.2.2, es necesario medir en la chimenea algunas de las magnitudes que debemos introducir en la expresión matemática que se ha indicado.

En la sección transversal del punto de muestreo es necesario determinar la posición y el número de puntos transversales para la medida de dichas magnitudes. El número de puntos transversales viene dado en función de las distancias del orificio de muestreo (Punto de Muestreo) a las perturbaciones tanto superiores como inferiores, y se calcula utilizando el gráfico de la Figura 1. Los puntos transversales necesarios se disponen en las distintas áreas equivalentes en que se divide la sección del punto de muestreo (ver ejemplo de la Figura 2).

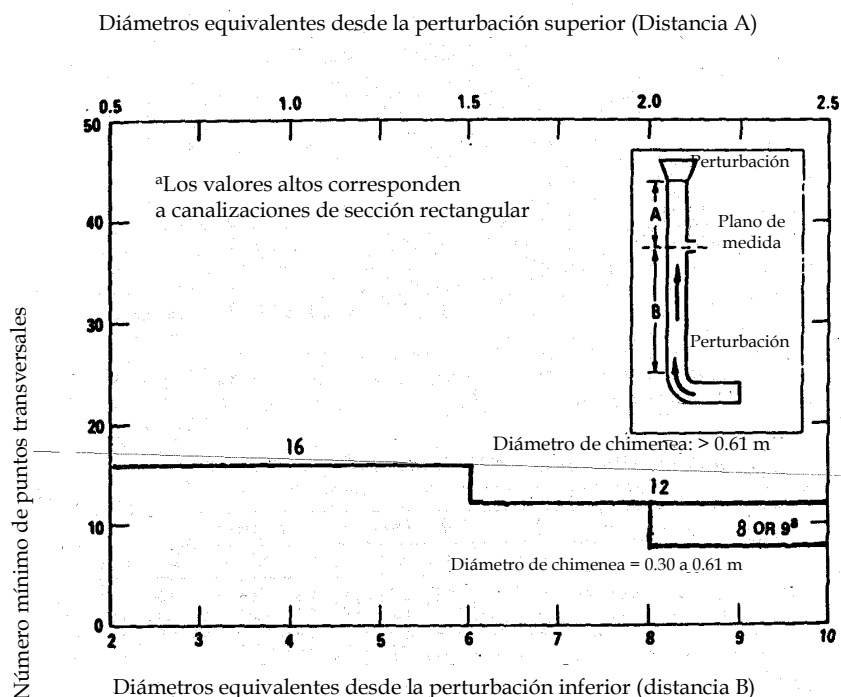


Figura 1.- Número mínimo de puntos transversales en la determinación de velocidad

Para determinar el número de puntos transversales con el gráfico de la Figura 1, se opera de la siguiente forma:

1. Se determinan las distancias desde el punto de muestreo a las perturbaciones superior (A) e inferior (B). Para expresar estas distancias en número de diámetros equivalentes, se dividen por el diámetro o diámetro equivalente de la canalización.
2. Tomando el dato A (expresado en número de diámetros equivalentes), entrar en el gráfico por la escala graduada horizontal superior, y trazar por este punto una línea vertical hasta que corte a la línea escalonada en la mitad inferior del gráfico. Anotar el dato del número de puntos.
3. Tomando el dato B (expresado en número de diámetros equivalentes), entrar en el gráfico por la escala graduada horizontal inferior, y trazar una línea vertical hasta que corte a la línea escalonada en la mitad inferior del gráfico. Anotar el dato del número de puntos transversales.
4. Cuando las distancias a las perturbaciones superior e inferior son superiores a 2 y 8 diámetros equivalentes, respectivamente, la línea escalonada se divide en dos tramos. El superior indica el número de puntos transversales para canalizaciones con diámetro equivalente mayor de 0.61 m, y el inferior para canalizaciones cuyo diámetro equivalente está comprendido entre 0.3 y 0.6 m.
5. Una vez determinado el número de puntos transversales como se indica en la secuencia de pasos 1 a 3, se elige el mayor de los dos valores que tenemos como número de puntos transversales a localizar en el punto de muestreo.

Para efectuar la distribución de estos puntos calculados efectuar las siguientes operaciones:

1. Chimeneas de sección circular: Utilizar la Tabla 1, en la cual se indica la distancia de cada punto a la pared de la canalización (expresada en porcentaje del diámetro equivalente). En la figura 2 se ha incluido un ejemplo.

Tabla. Localización de los puntos transversales en canalizaciones de sección circular
Porcentaje del diámetro de chimenea desde la pared interior hasta el punto concreto

Número del punto transversal (en un diámetro)	Número de puntos transversales en un diámetro											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14.6	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	85.4	25.0	14.6	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4			93.3	70.4	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7
5				85.4	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6
6				95.6	80.6	65.8	35.6	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6
7					89.5	77.4	64.4	36.6	28.3	23.6	20.4	18.0
8					96.8	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8
9						91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.2
10						97.4	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5
11							93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3
12							97.9	90.1	83.1	76.4	69.4	60.7
13								94.3	87.5	81.2	75.0	68.5
14								98.2	91.5	85.4	79.6	73.8
15									95.1	89.1	83.5	78.2
16									98.4	92.5	87.1	82.0
17										95.6	90.3	85.4
18										98.6	93.3	88.4
19											96.1	91.3
20											98.7	94.0
21												96.5
22												98.9
23												
24												

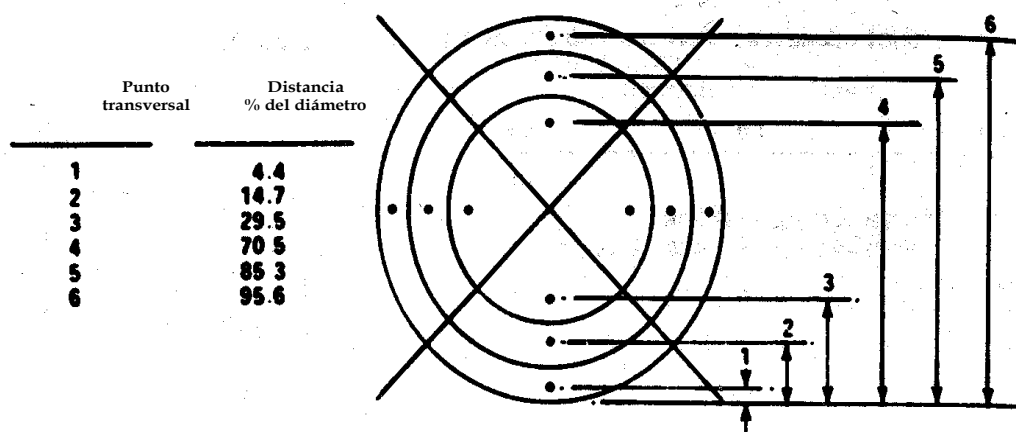


Figura.- 2 Ejemplo que muestra una sección circular dividida en 12 áreas equivalentes, con la localización de los puntos transversales

2. Chimeneas de sección rectangular: En este caso, cada uno de los puntos transversales necesarios se ha de disponer sobre el punto central de una de las áreas rectangulares elementales en que se ha dividido la sección del conducto (Ver Figura 3, en la que se representan hasta 18 puntos). Si el número de puntos transversales que obtenemos no es múltiplo de tres, se escoge el número superior que sea múltiplo de 3.

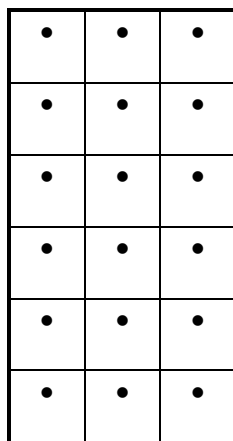


Figura 3

6.2.5.- Elección de la boquilla de la sonda.

Para la elección del diámetro de la boquilla que se va a instalar en la cabeza de la sonda debemos conocer:

La velocidad de salida de gases. Calculada como se ha indicado anteriormente.

Tiempo de muestreo (normalmente 1h).

Volumen que pretendemos muestrear (normalmente alrededor de 1000 l).

Rango de caudales adecuados al contaminante a muestrear y de succión que nos permite la bomba de nuestra sonda.

Sabiendo estos parámetros y que la velocidad del gas muestreado en la cabeza de la sonda (boquilla) debe ser igual a la velocidad de salida de gases por el conducto emisor (chimenea) se realizan los siguientes cálculos.

a) CAUDAL DE SUCCIÓN.

$$CAUDAL DE SUCCIÓN = \frac{VOLUMEN PRETENDIDO DE MUESTREO}{TIEMPO DE MUESTREO}$$

Comprobar que el caudal de succión sea adecuado al contaminante a retener (según método específico) y que la succión de nuestra sonda lo permite, (tiene que permitir regulación entorno a este valor).

b) ÁREA DE LA BOQUILLA (A_b).

$$AREA BOQUILLA(A_b) = \frac{CAUDAL DE SUCCIÓN}{VELOCIDAD SALIDA DE GASES}$$

c) DIÁMETRO DE LA BOQUILLA (Φ)

$$\Phi = \sqrt{\frac{4 A_b}{\pi}}$$

6.2.6.- Muestreo isocinético. Cálculo del número de puntos transversales necesarios.

Seguir la secuencia de operaciones descrita en el punto 6.2.4. En este caso, el gráfico a utilizar es el de la figura 4.

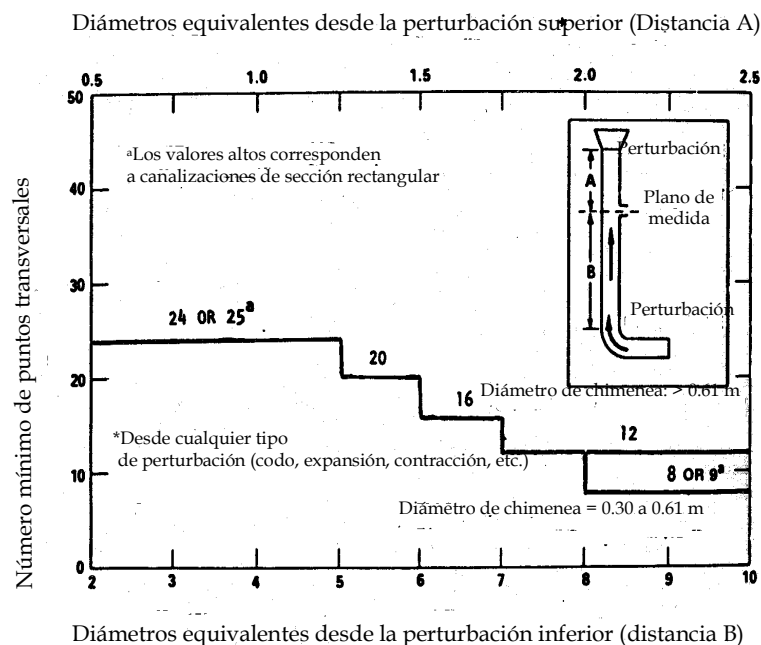


Figura 4.- Número mínimo de puntos transversales en un muestreo de materia particulada

6.2.7.- Cálculo del porcentaje de isocinetismo.

La comprobación del porcentaje de isocinetismo obtenido en el muestreo se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$\% I = \frac{\frac{P_M * V_M * T_S * 100}{P_S * T_M * F_S}}{A_b * t * V_S}$$

Donde:

A_b = Área de la boquilla en m^2 .

t = Tiempo de muestreo en segundos.

Este porcentaje debe estar comprendido entre 90-110 % para que los datos obtenidos puedan ser aceptados.

6.2.8.- Cálculo del volumen muestreado.

El volumen muestreado de gas seco en Condiciones Normales de presión y temperatura ($P = 760$ mm Hg y $T_a = 273$ °K), se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$VM_{CN} = V_M * \left(\frac{T_{CN} * P_M}{T_M * P_{CN}} \right)$$

VM_{CN} = Volumen seco de la muestra en condiciones normales.

6.2.9.- Cálculo de la concentración de contaminantes en los gases de emisión.

Si M_C es el peso total recogido de cualquier contaminante (en filtro, portafiltro, lavados de la sonda, boquilla, la primera mitad del portafiltro, borboteadores, etc), la concentración de contaminante medida $C_{\text{contaminante medida}}$ (expresada normalmente en $\text{mg/m}^3\text{N}$) será:

$$C_{\text{contaminante medida}} = \frac{M_C}{VM_{CN}}$$

La concentración de contaminante $C_{\text{contaminante medida}}$ calculada de esta forma hace referencia a la concentración de contaminante en condiciones reales de la medida de emisión, es decir para un % de O_2 y CO_2 en el foco de emisión.

6.2.10.- Corrección de la concentración de un contaminante.

En la legislación más reciente, se fijan los límites de emisión referidos a una concentración determinada de O_2 ó de CO_2 . Para transformar la $C_{\text{contaminante medida}}$ a una Concentración de contaminante corregida $C_{\text{contaminante corregida}}$ en función de un % de O_2 de referencia, se aplica la siguiente expresión:

$$C_{\text{contaminante corregida}} = C_{\text{contaminante medida}} \frac{(21\% \text{O}_2 - \% \text{O}_2 \text{ REFERENCIA})}{(21\% \text{O}_2 - \% \text{O}_2 \text{ MEDIDO})}$$

6.2.11.- Cálculo del caudal de gases.

El caudal volumétrico medio Q será:

$$Q = V_s * S$$

Donde:

S= Sección transversal del conducto.

El caudal volumétrico seco en condiciones Normales Q_{CN} (en m³/hora):

$$Q_{CN} = 3600 * F_s * V_s * S * \left(\frac{T_{CN} * P_s}{T_s * P_{CN}} \right)$$

Donde:

$$F_s = 1 - F_h$$

6.2.12.- Cálculo de la cantidad de contaminantes emitidos.

En una fuente estacionaria el cálculo de la emisión de un contaminante se realiza aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{EMISIÓN DE CONTAMINANTE (kg/h)} = C_{\text{contaminante medida}} \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * Q_{CN} \text{ (Nm}^3\text{/h)} * 10^{-6}$$

7.- CASO PRÁCTICO.

Para una planta incineradora de Residuos Peligrosos contestar a las siguientes cuestiones:

1.- Calcular las distancias óptimas a colocar los orificios de muestreo, número de orificios y su colocación en el plano de muestreo (tener en cuenta que en la cota 10 m. están colocados los equipos de medida en continuo de la instalación).

Sabiendo que:

- a) El diámetro real (interior) de la chimenea es de 2 m.
- b) La altura de la chimenea es de 60 m.

2.- A partir de los datos que se indican a continuación contestar las correspondientes preguntas

a) Datos generales:

- Temperatura ambiente: 18 °C.
- Presión atmosférica: 780 mm Hg.
- Temperatura de los gases de emisión: 140 °C.
- Presión Absoluta dentro de la chimenea: 795 mmHg.
- Humedad de los gases: 17 %
- Velocidad de gases: 12,71 m/s

- La legislación establece para la comparación de los límites de emisión en las instalaciones incineradoras de residuos peligrosos que las determinaciones estén referidas a un 11 % de O₂).

b) Datos obtenidos en las determinaciones auxiliares:

- Concentración de O₂: 12 %
- Concentración de CO₂: 12 %

c) Datos de caracterización de partículas

- Volumen de muestreo medido en el contador de gas: 1.100 l
- Masa de partículas retenida en el filtro: 8 mg

d) Concentración de CO: 38 ppm

- ¿Cumple esta instalación incineradora la legislación, suponiendo que el valor límite horario son 10 mg/Nm³?

- Calcular la masa total de partículas y de CO₂ que es emitida por la incineradora al día suponiendo un funcionamiento continuado de 24 h/día.

- ¿Cumple la legislación instalación en referencia al CO, suponiendo que el límite de emisión es de 50 mg/Nm³?