

DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN FUENTES FIJAS

DETERMINATION OF PARTICULATE MATTER EMISSION FROM STATIONARY SOURCES

Por

Carlos Alberto Echeverri Londoño¹, Medellín, 2006

RESUMEN

Este artículo presenta una guía metodológica para determinar la emisión de partículas (material particulado) a través de un muestreo isocinético en fuentes fijas, y contempla los requisitos básicos y equipos empleados para realizar un muestreo. La determinación de la cantidad de material particulado presente en una emisión atmosférica requiere de mucho cuidado y el uso de equipos adecuados puesto que la concentración del contaminante que interesa es relativamente pequeña.

Palabras claves: Muestreo isocinético, Tren de muestreo, muestreador de chimenea, fuentes fijas.

ABSTRACT

This article presents a methodologic guide in order to determine the particulate (particulate matter) emission through a isokinetical sampling in stationary sources, and contemplates the basic requirements and used equipment to make a sampling. The determination of the amount of particulate matter present in an atmospheric emission requires of much care and the use of suitable equipment since the concentration of the polluting agent that interests is relatively small.

Key words: Isokinetical sampling, sampling train, stack sampler, stationary sources.

¹ Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental. Profesor Universidad de Medellín (Colombia). e-mail: cecheverri@udem.edu.co

1. INTRODUCCIÓN.

La caracterización de una fuente de contaminación atmosférica consiste en darle respuesta a las siguientes preguntas: ¿Que se emite?, ¿Cuanto se emite? y ¿Donde se emite?

El grado de exactitud en la respuesta a las anteriores preguntas, tiene que ver con el objetivo de la caracterización de la fuente.

Son cuatro los objetivos fundamentales por los cuales se procede a caracterizar las fuentes de contaminación atmosférica:

- a) Realizar un inventario general de las fuentes. Con este se persigue normalmente realizar una evaluación inicial de la problemática en un área urbana y/o industrial y por lo tanto no exige una caracterización exhaustiva de las emisiones.
- b) Establecer un programa de monitoreo de calidad de aire. En este caso se requiere información de tipo general, identificando los principales contaminantes emitidos y las cantidades aproximadas emitidas.
- c) Definir los parámetros de diseño en un proyecto de control. Se requiere una información detallada de las características de los contaminantes.
- d) Certificar el cumplimiento de las normas de emisión. En este caso se requiere información muy precisa en lo referente a flujo másico del contaminante emitido.

2. MUESTREO DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES.

Este método consiste en tomar una muestra de la emisión que permita determinar la concentración del contaminante y el flujo del gas portador, con el fin de calcular el flujo másico del contaminante. Este muestreo se realiza con un muestreador de chimenea (figuras 1 y 2), cuyo esquema básico se muestra en la figura 3.

La muestra debe tomarse cumpliendo con el requisito de no generar una separación mecánica de los contaminantes con respecto al gas portador, en otras palabras la toma de la muestra debe realizarse a la misma velocidad en que son transmitidos los contaminantes en el ducto de muestreo; al cumplimiento de este requisito se le denomina muestreo isocinético. El porcentaje de isocinetismo esta dado por la siguiente ecuación:

$$\%Isocinetismo = 100 \frac{V_n}{V_s} \quad (1)$$

En la cual:

V_n = Velocidad de toma de muestra.

V_s = Velocidad de gases en chimenea.

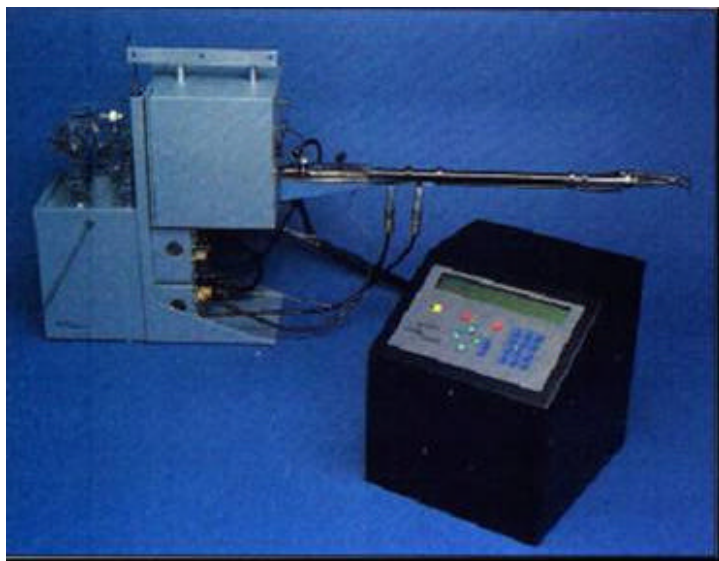


Figura 1. Muestreador de chimenea AST (Auto Sampling Train) marca Andersen Instruments Inc.

Cuando se presentan condiciones no isocinéticas (ver figura 4):

- a) Las partículas mayores tienden a moverse en la misma dirección inicial.
- b) Las partículas menores tienden a seguir las líneas de flujo.

c) Las partículas intermedias sufren alguna deflexión.



Figura 2. Muestreador de chimenea MST (Manual Sampling Train) marca Andersen Instruments Inc.

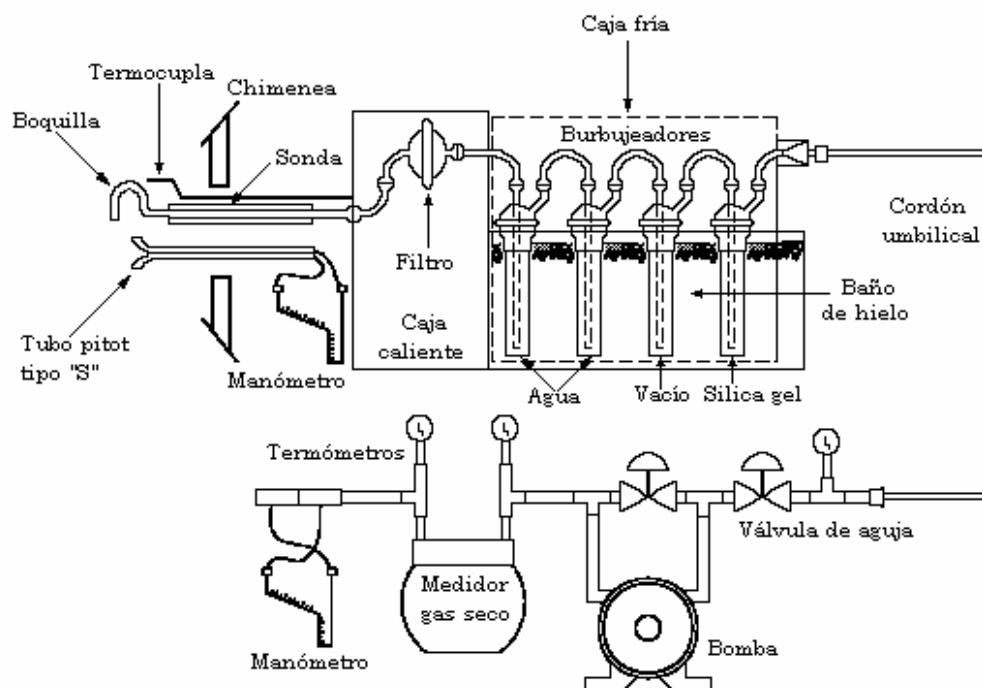


Figura 3. Tren de muestreo isocinético para material particulado.

Lograr que la toma de muestra se realice en forma isocinética, requiere la adopción de una estrategia de muestreo que incluye los siguientes métodos definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

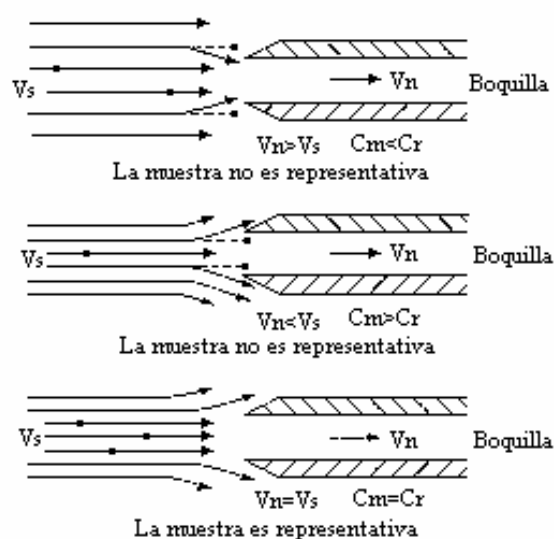


Figura 4. Muestreo Isocinético vs. No Isocinético.

3. MÉTODO 1: LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.

3.1. PRINCIPIO.

Para obtener una medición representativa de las emisiones de contaminantes y/o los caudales de una fuente estacionaria, se selecciona un sitio de medición en la chimenea en donde la corriente fluye en una dirección conocida. Se divide la sección transversal de la chimenea en un número de áreas iguales y se localiza un punto de travesía dentro de cada una de estas áreas iguales.

3.2. APLICABILIDAD.

Este método es aplicable para corrientes de gas que fluyen en ductos y chimeneas. El método no puede ser usado cuando: (1) El flujo es ciclónico o turbulento, (2) El diámetro de la chimenea es inferior a 0.30 m ó tiene

un área transversal inferior a 0.071 m²; o (3) El sitio de medición tiene menos de dos diámetros de chimenea o ducto corriente abajo o menos de medio diámetro corriente arriba después de una perturbación.

3.3. LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN ADECUADO.

Se considera que la sección del ducto más adecuada para ubicar el sitio de medición es aquella que tiene una distancia equivalente de ocho (8) diámetros corriente abajo después de una perturbación y dos (2) diámetros corriente arriba antes de la siguiente es la, ya que en esta franja se encuentra un flujo laminar. Cuando lo anterior no puede cumplirse, se debe localizar el sitio de medición por lo menos a dos (2) diámetros de chimenea o ducto corriente abajo después de una perturbación y por lo menos a medio (0.5) diámetro corriente arriba antes de una perturbación, con el propósito de aumentar el número de puntos de muestreo en la sección transversal y obtener un muestreo más representativo.

Para ductos rectangulares se usa el término diámetro equivalente, el cual se define así:

$$De = \frac{2LW}{(L+W)} \quad (2)$$

En la cual L y W son las dimensiones (largo y ancho) de la sección transversal de la chimenea.

3.4. ADECUACIÓN DEL SITIO.

Una vez elegido el sitio se adecua cumpliendo los siguientes requisitos:

- Que la plataforma sea amplia y resistente (ver figura 5).
- Que sea de fácil acceso.
- Que cuente con suministro de energía eléctrica (110 V C.A.).
- Que cuente con protección necesaria para evitar los cortos circuitos y choques eléctricos.

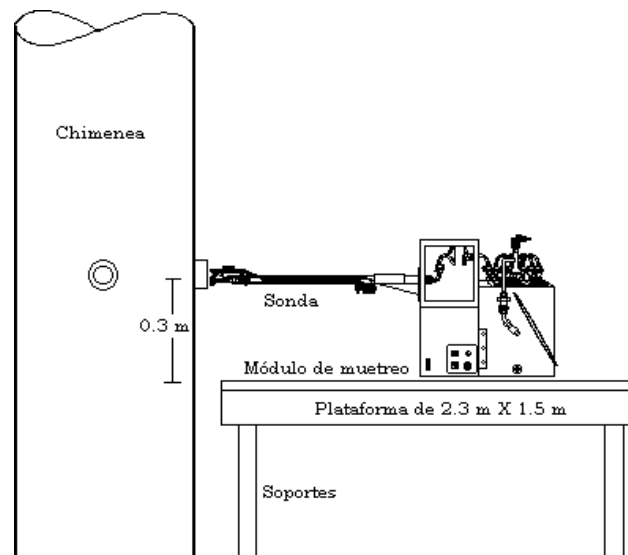


Figura 5. Plataforma de muestreo.

Las plataformas se colocan alrededor del sitio de medición. Para chimeneas circulares, se debe localizar el sitio de muestreo por lo menos a dos diámetros de chimenea o ducto corriente abajo y por lo menos a medio diámetro corriente arriba después de una perturbación.

Para ductos rectangulares se divide el ducto en áreas iguales (mínimo 9) y se muestrea en los puntos medios de dichas áreas (ver figura 8). Para ductos rectangulares se recomienda construir la plataforma según las normas de montaje ya establecidas. El total de puntos a muestrear se determina a través de la figura 6.

Para usar la figura 6 se debe calcular la distancia (en números de diámetros de chimenea) antes y después de la perturbación más cercana al punto de medición. Para eso, se debe determinar la distancia desde el lugar de medición hasta las perturbaciones corriente arriba y corriente abajo más cercanas, y dividir cada distancia por el diámetro de la chimenea o diámetro equivalente para determinar la distancia en términos de número de diámetros. Las perturbaciones pueden ser cualquier tipo de curvas, expansiones, contracciones, entradas, etc.

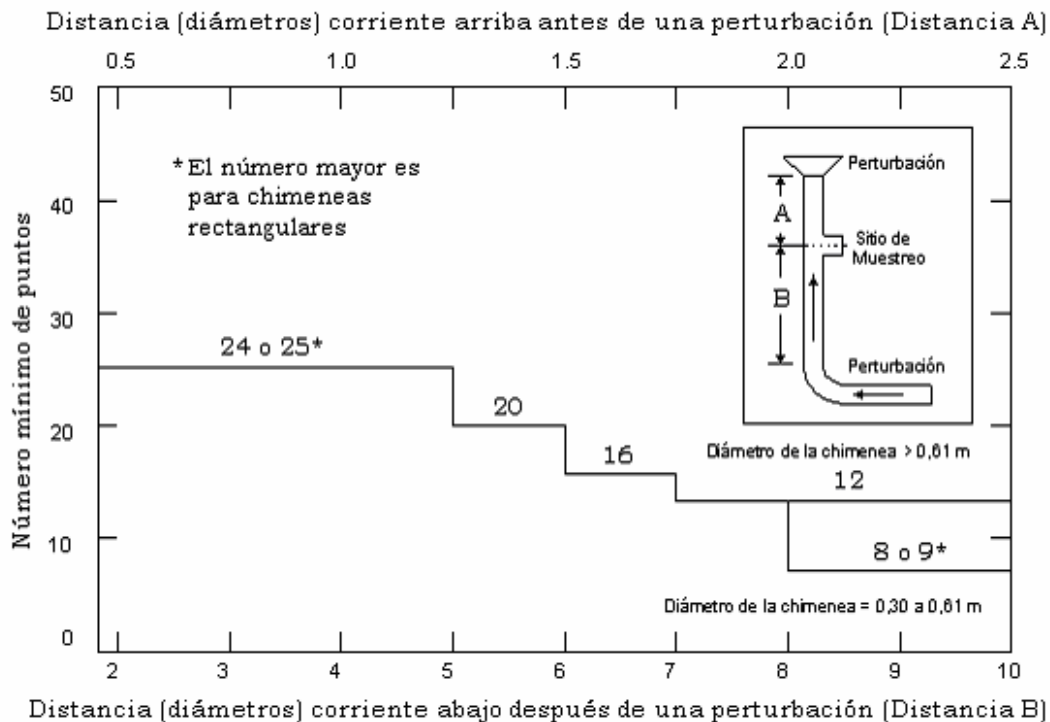


Figura 6. Número mínimo de puntos de muestreo.

Luego, se selecciona de la figura 6 el número mínimo de puntos de muestreo correspondiente al valor más alto entre los dos números mínimos correspondientes a las distancias corriente arriba y corriente abajo, o un valor mayor, de modo que para chimeneas circulares el número sea múltiplo de cuatro (4).

La ubicación de los puntos de muestreo en ductos y chimeneas circulares (porcentaje del diámetro a partir de la pared interna) se determina a través de la tabla 1 (ver figura 7).

Para chimeneas rectangulares, se debe dividir la sección transversal en tantas áreas rectangulares como puntos de muestreo, con el propósito de obtener el arreglo de las matrices de la tabla 2. La relación entre la longitud y el ancho de cada área elemental debe estar entre uno y dos.

Tabla 1. Número de puntos de travesía sobre el diámetro.

Numeración del punto de muestreo en un diámetro	Número de puntos de muestreo en un diámetro					
	2	4	6	8	10	12
1	14.6	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1
2	85.4	25.0	14.6	10.5	8.2	6.7
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8
4		93.3	70.4	32.3	22.6	17.7
5			85.4	67.7	34.2	25.0
6			95.6	80.6	65.8	35.6
7				89.5	77.4	64.4
8				96.8	85.4	75.0
9					91.8	82.3
10					97.4	88.2
11						93.3
12						97.9

Nota: Los puntos de muestreo no podrán estar localizados a una distancia inferior de 1.3 cm. de la pared de la chimenea para chimeneas con diámetros menores o iguales a 0.61 m, y a una distancia de 2.5 cm. para chimeneas con diámetros mayores de 0.61 m. Ajustar la ubicación del primero y último punto según este criterio.

Tabla 2. Arreglo de la sección transversal para chimeneas rectangulares.

Número de puntos de muestreo	Matriz
9	3×3
12	4×3
16	4×4
20	5×4
25	5×5
30	6×5

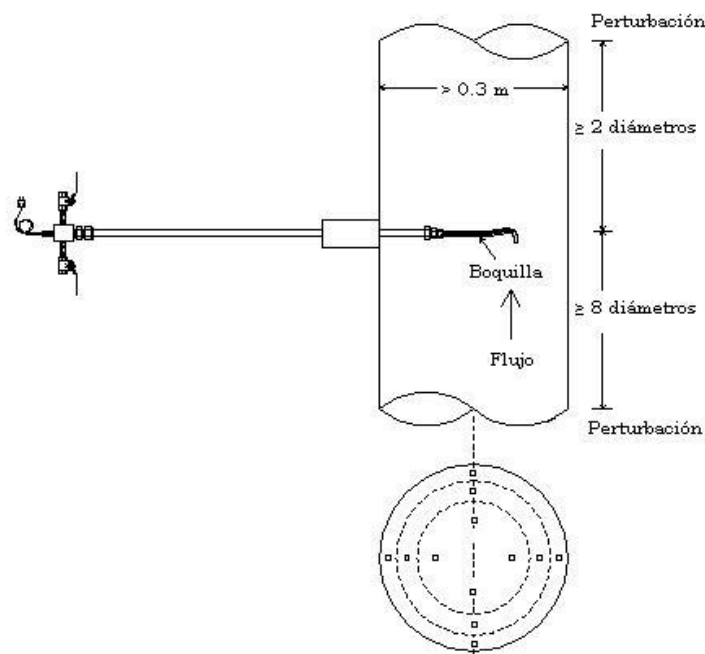


Figura 7. Ubicación de los puntos de muestreo.

Para chimeneas con diámetros menores a 0.3 m (Método 1A), el sitio de muestreo se debe ubicar a ocho (8) diámetros corriente abajo después de una perturbación y diez (10) diámetros corriente arriba antes de la siguiente. Cuando lo anterior no puede cumplirse, se debe localizar el sitio de muestreo por lo menos a dos (2.0) diámetros de chimenea o ducto corriente abajo después de una perturbación y por lo menos a dos y medio (2.5) diámetros corriente arriba antes de una perturbación, con el propósito de aumentar el número de puntos de muestreo en la sección transversal y obtener un muestreo más representativo. Este método no se puede aplicar cuando el flujo es turbulento.

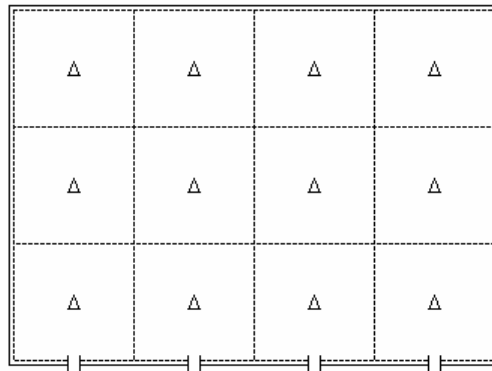


Figura 8. Sección transversal de una chimenea rectangular dividida en 12 áreas iguales con puntos de muestreo centrados en cada área.

4. MÉTODO 2: DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL GAS EN LA CHIMENEA Y EL CAUDAL (TUBO PITOT TIPO S).

4.1. PRINCIPIO.

La velocidad y el caudal del gas en la chimenea se determinan a través de la densidad del gas y de la medición de la presión de velocidad promedio (presión dinámica) con un tubo pitot tipo “S”.

El tubo pitot estándar puede usarse en lugar de uno tipo “S”, sin embargo, como los orificios de presión estática y absoluta del tubo pitot estándar son susceptibles a obstruirse por las partículas presentes en la corriente gaseosa; siempre que se utilice un tubo pitot estándar para realizar una travesía, se debe inspeccionar el tubo pitot para asegurarse que los orificios no se han tapado durante la medición. Esto se puede lograr comparando la medición de la presión de velocidad (ΔP) registrada en un punto de travesía seleccionado con una segunda medición de ΔP registrada en el mismo punto después hacer pasar aire presurizado en contracorriente por el tubo pitot para limpiar los orificios de presión absoluta y estática. Si las mediciones de ΔP , antes y después; están dentro de un 5 % de diferencia, entonces los datos de la travesía son aceptables.

Para ductos con diámetros menores a 0.30 m, la velocidad del gas debe medirse usando un tubo pitot estándar, ya que la utilización de un tubo pitot tipo “S” produce mediciones inexactas. La velocidad de gas se mide usando un tubo pitot estándar corriente abajo del sitio real de muestreo de la emisión. La distancia del ducto entre el sitio de muestreo de partículas y el sitio de medición de la velocidad permiten que el perfil de flujo, temporalmente perturbado por la presencia de la sonda, se vuelva a desarrollar y a estabilizar.

Como el método 1A no se puede aplicar cuando el flujo es turbulento, se deben realizar mediciones de ΔP , antes y después del muestreo de partículas, y comparar su desviación. El muestreo de partículas es aceptable siempre y cuando la desviación de las mediciones de ΔP , antes y después del muestreo, no exceda el 10 %.

La figura 9 muestra dos tipos de tubo pitot: (a) tubo pitot en “S” y (b) tubo pitot estándar. El primero se utiliza generalmente para las mediciones de campo en chimeneas con diámetro mayor de 0.3 m, mientras el segundo se utiliza para la calibración de los tubo pitot en “S” o para las mediciones de campo en chimeneas con diámetro menor de 0.3 m.

4.2. APLICABILIDAD.

Este método es aplicable para medir la velocidad promedio de una corriente de gas y para cuantificar el caudal de gas.

La figura 10 muestra en forma esquemática como se miden las presiones estática, absoluta y de velocidad (dinámica). Las presiones deben permanecer estables por lo menos 15 segundos antes de registrarlas.

La velocidad del gas en la chimenea se relaciona con la presión de velocidad a través de la ecuación de Bernulli:

$$V_s = K_p C_p \sqrt{\frac{\overline{DP} T_s}{P_s M_s}} \quad (3)$$

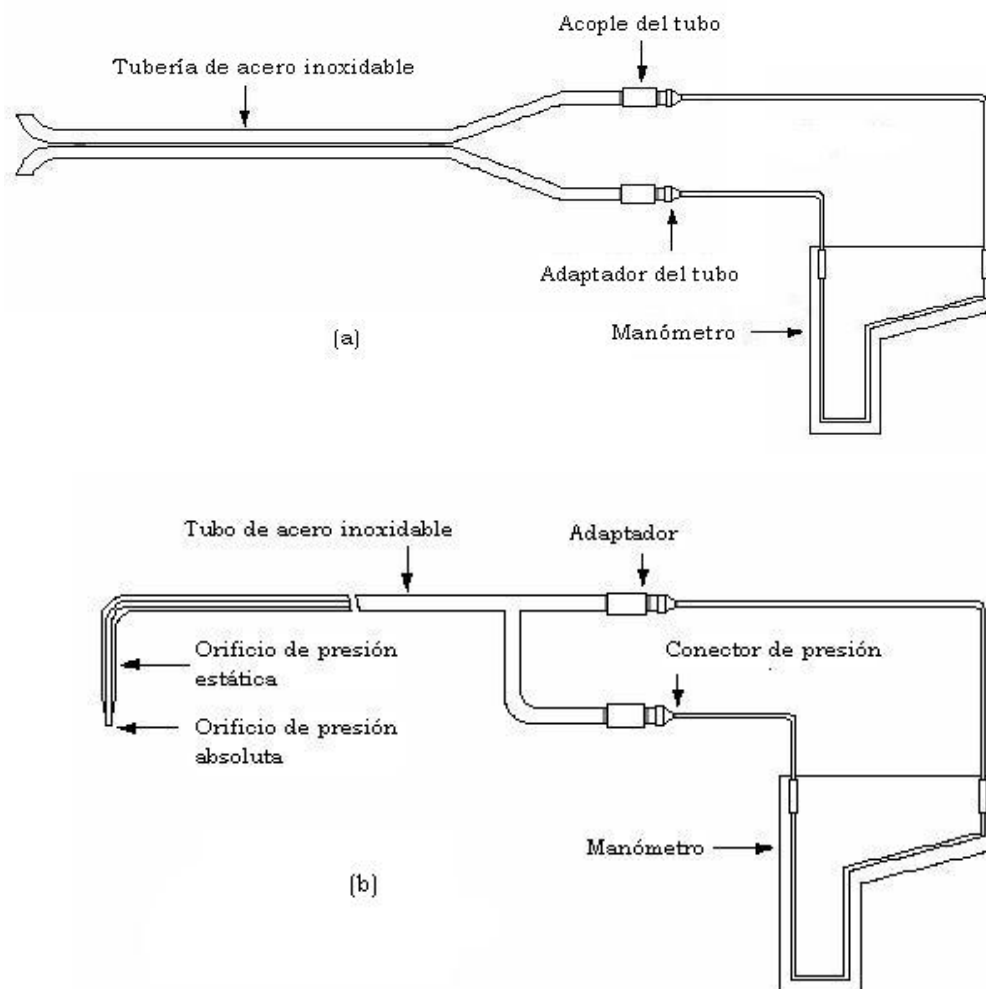


Figura 9. Tubos pitot.

En la cual:

V_s = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s.

K_p = Constante del tubo pitot (34.97).

C_p = Coeficiente del tubo pitot.

$\overline{DP}$ = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mm H₂O.

T_s = Temperatura promedio del gas en la chimenea, K.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

M_s = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

La presión de velocidad promedio del gas en la chimenea se obtiene de la siguiente forma:

$$\overline{DP} = \left(\frac{\sum \sqrt{DP_i}}{n} \right)^2 \quad (4)$$

En la cual:

$\overline{DP}$ = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mm H₂O.

DP_i = Presiones de velocidad en cada punto de muestreo, mm H₂O.

n = Número de puntos de muestreo.

La presión absoluta del gas en la chimenea es igual a:

$$P_s = P_a + \frac{P_e}{13.6} \quad (5)$$

En la cual:

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

P_a = Presión barométrica, mm Hg.

P_e = Presión estática promedio en la chimenea, mm H₂O.

Los muestreadores de chimenea automáticos reportan directamente la presión absoluta del gas en la chimenea, mientras que en los muestreadores manuales se requiere medir la presión estática para luego calcular la presión absoluta.

Para determinar la masa molar del gas en la chimenea se requiere de los métodos 3 y 4 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

El caudal de gases en la chimenea se puede calcular multiplicando la velocidad de los gases por el área transversal del ducto, así:

$$Q_s = 3600 V_s A_s \quad (6)$$

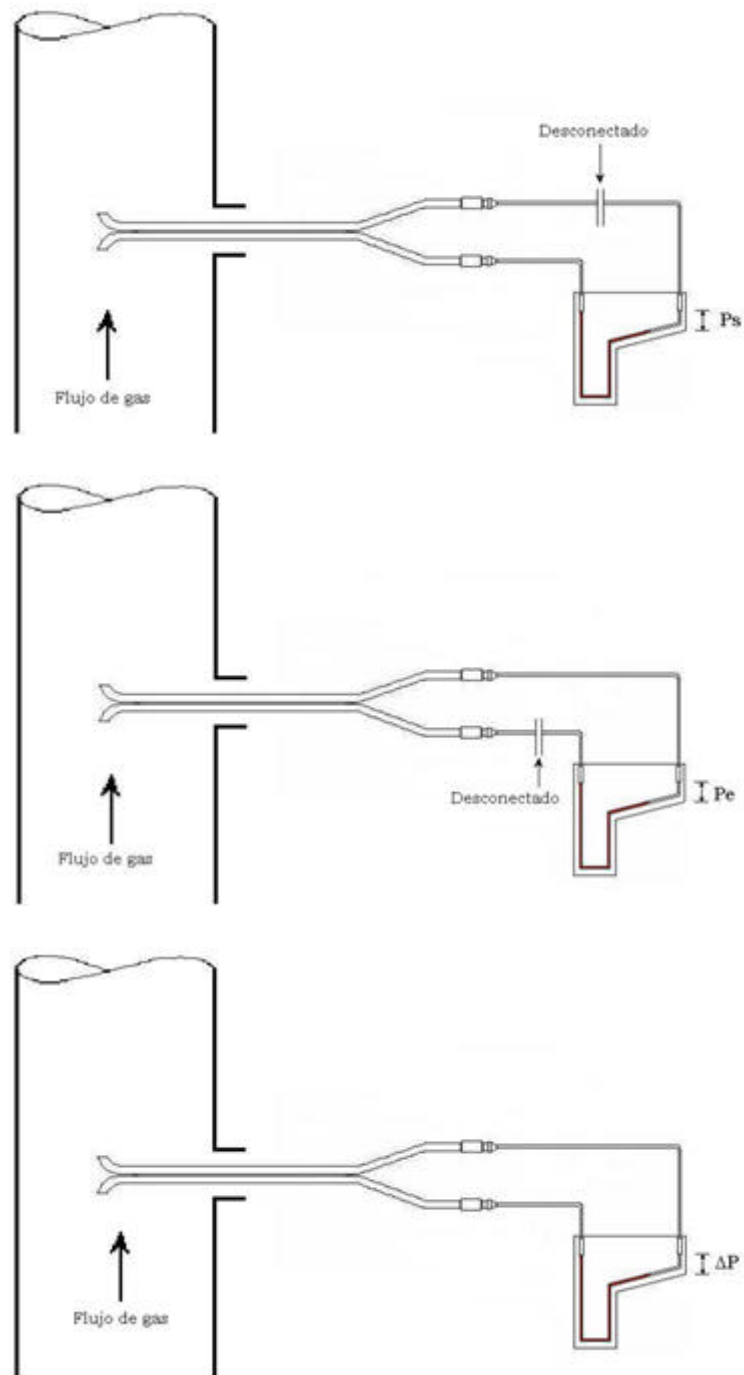


Figura 10. Medición de las presiones absoluta (P_s), estática (P_e) y la de velocidad (DP).

En la cual:

Q_s = Caudal de gases en la chimenea a condiciones de chimenea, m^3/h .

V_s = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s .

A_s = Área transversal de la chimenea, m^2 .

El área transversal de las chimeneas se hallar dependiendo de la forma de las mismas. Para chimeneas circulares:

$$A_s = p \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 \quad (7)$$

En la cual:

A_s = Área transversal de la chimenea, m^2 .

D_s = Diámetro de la chimenea, m .

Para chimeneas rectangulares:

$$A_s = L W \quad (8)$$

En la cual:

A_s = Área transversal de la chimenea, m^2 .

L = Largo de la chimenea, m .

W = Ancho de la chimenea, m .

La concentración de partículas determinada en el muestreo isocinético es en base seca y a condiciones de referencia debido a que a la muestra de gases tomada de la chimenea se le retira la humedad en los burbujeadores y las temperaturas de la chimenea y el muestreador son diferentes. Por lo tanto, para determinar la emisión de partículas el caudal de gases en la chimenea se debe calcular en base seca y corregido a condiciones de referencia. El caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia es:

$$Q_{sref} = 3600 (1-B_{ws}) V_s A_s \frac{T_{ref}}{T_s} \frac{P_s}{P_{ref}} \quad (9)$$

En la cual:

Q_{sref} = Caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia, m^3/h .

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

V_s = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s .

A_s = Área transversal de la chimenea, m^2 .

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

T_s = Temperatura promedio del gas en la chimenea, K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

5. MÉTODO 3: DETERMINACIÓN DE LA MASA MOLAR DEL GAS.

5.1. PRINCIPIO.

Una muestra de gas se extrae de la chimenea. Se analiza en la muestra de gas los porcentajes de dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO). Si se requiere la determinación de la masa molar seca y el aire en exceso se debe usar para el análisis un analizador Orsat o un analizador específico (método 100).

5.2. APLICABILIDAD.

Este método es aplicable para determinar las concentraciones de CO , CO_2 y O_2 , aire en exceso y la masa molar seca de la muestra de una corriente de gas de un proceso de combustión de un combustible fósil. El método puede también aplicarse a otros procesos en los cuales se ha determinado que otros compuestos diferentes a CO_2 , O_2 , CO , y nitrógeno (N_2) no están presentes en concentraciones suficientes para afectar los resultados.

Otros métodos, conocidos como modificaciones del procedimiento son también aplicables para algunas de las determinaciones. Algunos ejemplos de métodos específicos y modificaciones incluyen: (1) método de muestreo multipunto usando un analizador Orsat para analizar muestras individuales obtenidas en cada punto; (2) un método usando cálculos estequiométricos de CO_2 y O_2 para determinar la masa molar seca y el aire

en exceso; (3) asignando un valor de 30.0 a la masa molar seca a falta de mediciones reales, especialmente para procesos de combustión de gas natural, carbón, fuel oil o crudo de castilla.

La figura 11 muestra el analizador de gases de combustión marca Bacharach 300-NSX que consta de varias celdas electroquímicas que sirven para determinar a través de lectura directa la concentración de oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO) en los gases de combustión, y calcular la concentración de dióxido de carbono (CO_2) al introducirle al equipo el combustible que se esta utilizando.



Figura 11. Analizador Bacharach 300 NSX.

La figura 12 muestra un aparato Orsat para el análisis de los gases de combustión. Las partes esenciales son una bureta para medir el volumen de los gases y varios burbujeadores conectados entre sí a través de una tubería común. Cada burbujeador contiene una solución absorbente y puede aislarse para que el gas, con un volumen determinado, pase a través de ellos. Cada solución absorbe un determinado componente, de manera que si se mide el volumen antes y después de pasar por cada

solución, la diferencia representará el volumen absorbido por ella, que corresponde al componente que la solución en cuestión es capaz de absorber.

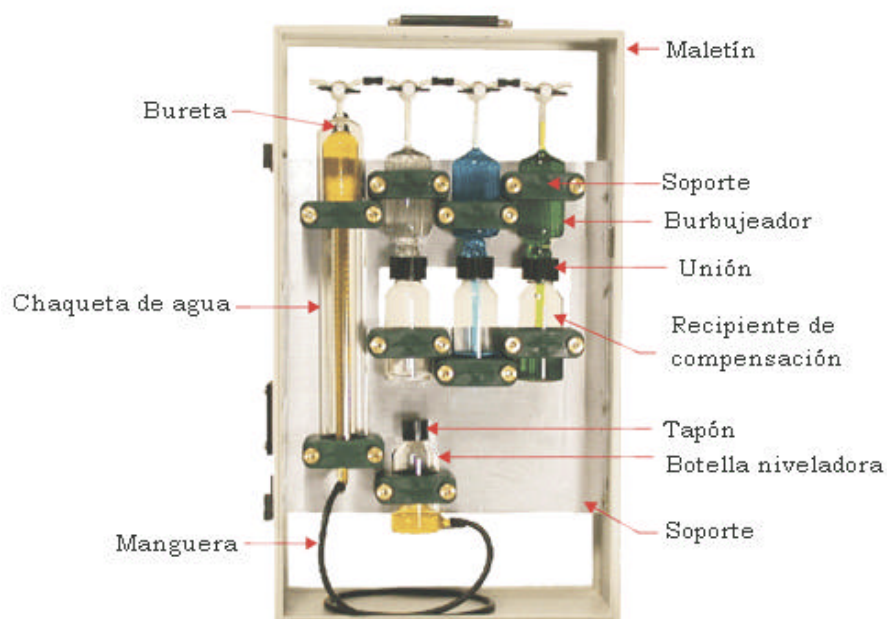


Figura 12. Aparato Orsat para analizar gases de combustión.

El gas se introduce o se extrae del aparato, subiendo o bajando la botella niveladora, que contiene agua. La bureta se llena con los gases de combustión y su volumen se determina cuidadosamente. Luego, se pasa el gas al recipiente que contiene una solución concentrada de hidróxido de potasio que absorbe el dióxido de carbono (CO_2); el gas remanente se regresa a la bureta medidora y se determina el volumen; la diferencia con el volumen original representa el dióxido de carbono absorbido.

$$\% \text{CO}_2 = 100 \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \quad (10)$$

De modo similar, se va haciendo pasar el resto por el burbujeador que contiene una solución alcalina de pirogalol que absorbe oxígeno (O_2).

$$\%O_2 = 100 \frac{(V_2 - V_3)}{V_1} \quad (11)$$

Después se hace pasar por el burbujeador que contiene una solución ácida de cloruro cuproso para absorber el monóxido de carbono (CO).

$$\%CO = 100 \frac{(V_3 - V_4)}{V_1} \quad (12)$$

$$\%N_2 = 100 \frac{V_4}{V_1} \quad (13)$$

El análisis Orsat es en base seca; esto quiere decir que no se tiene en cuenta el vapor de agua presente en los gases de combustión.

Si los gases de combustión contienen dióxido de azufre, hidrocarburos u otros gases diferentes a CO₂, CO, O₂ y N₂, el análisis Orsat normal no los determina, y los adiciona al valor del dióxido de nitrógeno (N₂).

Una vez realizado el análisis Orsat (análisis de los gases de combustión) se determina la masa molar del gas seco en la chimenea a partir del porcentaje molar de los gases de combustión.

$$M_d = 0.44(\%CO_2) + 0.32(\%O_2) + 0.28(\%CO + \%N_2) \quad (14)$$

En la cual:

M_d = Masa molar del gas seco en la chimenea, g/mol.

La ecuación 14 no considera el argón en el aire (aproximadamente 0.9%, con un peso molecular de 39.9). Un error negativo de aproximadamente 0.4% es introducido. El personal técnico puede escoger incluir el argón en el análisis de la masa molar del gas seco en la chimenea.

6. MÉTODO 4: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GASES DE LA CHIMENEA.

6.1. PRINCIPIO.

Una muestra de gas es extraída de la fuente a una velocidad constante, la humedad es removida de la muestra de la corriente y determinada volumétrica o gravimétricamente.

6.2. APLICABILIDAD.

Este método es aplicable para determinar el contenido de humedad del gas de chimenea. Dos procedimientos son dados: El primero es un método de referencia, para determinaciones exactas del contenido de humedad (tal como son necesarias para calcular emisiones). El segundo es un método aproximado que suministra estimativos del porcentaje de humedad para ayudar en el establecimiento del muestreo isocinético con anterioridad a la medición de la emisión de contaminantes. El método aproximado descrito aquí es un acercamiento sugerido. Son también aceptables métodos alternativos para calcular el contenido de humedad como: tubos secantes, mediciones de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (psicrometría), técnicas de condensación, cálculos estequiométricos, experiencia previa, etc.

El método de referencia consiste en tomar una muestra de los gases que circulan por la chimenea, succionándolos con una bomba que los hace pasar a través de un filtro para retener las partículas y por unos burbujeadores, que se encuentran en un baño de hielo, para condensar la humedad. De acuerdo con el volumen de gases muestreado y el volumen de agua recolectada se determina el porcentaje de humedad de los gases.

El volumen de vapor de agua, corregido a condiciones de referencia, colectado en los burbujeadores es:

$$V_{wref} = \left[(V_f - V_i) r_w + (W_f - W_i) \right] \frac{R T_{ref}}{P_{ref} M_w} \quad (15)$$

En la cual:

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m³.

V_f = Volumen final de agua en los tres primeros burbujeadores, mL.

V_i = Volumen inicial de agua en los tres primeros burbujeadores, mL.

r_w = Densidad del agua, 0.9982 g/mL.

W_f = Peso final de la silica gel o del último burbujeador, g.

W_i = Peso inicial de la silica gel o del último burbujeador, g.

R = Constante de los gases ideales, 0.06236 mm Hg m³/mol K.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

M_w = Masa molar del agua, 18.0 g/mol.

Si en lugar de medir los volúmenes inicial y final de agua en los tres primeros burbujeadores, estos se pesan para determinar la cantidad de agua recolectada, la ecuación 15 se modifica de esta manera:

$$V_{wref} = (P_f - P_i) \frac{R T_{ref}}{P_{ref} M_w} \quad (16)$$

En la cual:

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m³.

P_f = Peso final de agua en todos los burbujeadores, g.

P_i = Peso inicial de agua en todos los burbujeadores, g.

R = Constante de los gases ideales, 0.06236 mm Hg m³/mol K.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

M_w = Masa molar del agua, 18.0 g/mol.

Los tres primeros burbujeadores, además de ganar peso por el agua colectada, también lo pueden hacer por las partículas que atraviesan el filtro (partículas menores de 0.3 µm) y quedan atrapadas en el líquido. Por eso se registra el volumen de agua recolectado y no su peso. Sin embargo,

la masa de las partículas recogidas es tan pequeña con respecto a la del agua recolectada que la masa de las partículas se puede despreciar. Otra alternativa es, corregir el peso del agua recogida en los burbujeadores al restarle el peso de las partículas que quedan atrapadas en el líquido.

El volumen de gas seco medido por el medidor gas, corregido a condiciones de referencia es:

$$V_{mref} = V_m Y \frac{P_m T_{ref}}{P_{ref} T_m} \quad (17)$$

En la cual:

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m³.

V_m = Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, m³.

Y = Factor de calibración del medidor de gas seco.

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

T_m = Temperatura promedio en el medidor de gas seco, K.

La presión absoluta en el medidor de gas seco es igual a:

$$P_m = P_a + \frac{\overline{DH}}{13.6} \quad (18)$$

En la cual:

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

P_a = Presión barométrica, mm Hg.

$\overline{DH}$ = Presión diferencial promedio a través del orificio, mm H₂O.

El contenido de humedad de los gases en la chimenea esta dado por la siguiente ecuación:

$$B_{ws} = \frac{V_{wref}}{V_{wref} + V_{mref}} \quad (19)$$

En la cual:

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m^3 .

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m^3 .

El método de referencia frecuentemente se realiza simultáneamente con una medición de emisión de contaminantes; cuando es así, el cálculo del porcentaje isocinético y la emisión de contaminantes para la corrida se basarán sobre los resultados del método de referencia o su equivalente.

Nota: El método de referencia (figura 3) puede producir resultados cuestionables cuando es aplicable a corrientes gaseosas saturadas o corrientes que contienen gotas de agua. Por lo tanto, cuando estas condiciones existen o son sospechadas, se realizará una segunda determinación del contenido de humedad con el método de referencia, así: Asumir que la corriente de gas esta saturada. Colocar un sensor de temperatura (capaz de medir hasta 1 °C) a la sonda del método de referencia. Medir la temperatura del gas de la chimenea en cada punto de la travesía durante la travesía del método de referencia; calcular la temperatura promedio del gas en la chimenea. A continuación, se debe determinar el porcentaje de humedad así: (1) Usando una carta psicrométrica y haciendo correcciones apropiadas si la presión de la chimenea es diferente a la de la carta, ó (2) usando las tablas de presión de vapor saturado.

En el método aproximado (figura 13) para el muestreo del contenido de humedad solamente se utilizan dos burbujeadores, cada uno con 5 mL de agua, y se toma la muestra de gas con un caudal constante de 2 L/min hasta que el medidor de gas seco registre aproximadamente 30 L. Por lo tanto, la ecuación 15 ó 16 solamente tendrá en cuenta el peso de los dos burbujeadores. El contenido de humedad en la corriente gaseosa determinado por el método aproximado esta dado por:

$$B_{ws} = \frac{V_{wref}}{V_{wref} + V_{mref}} + B_{wm} \quad (20)$$

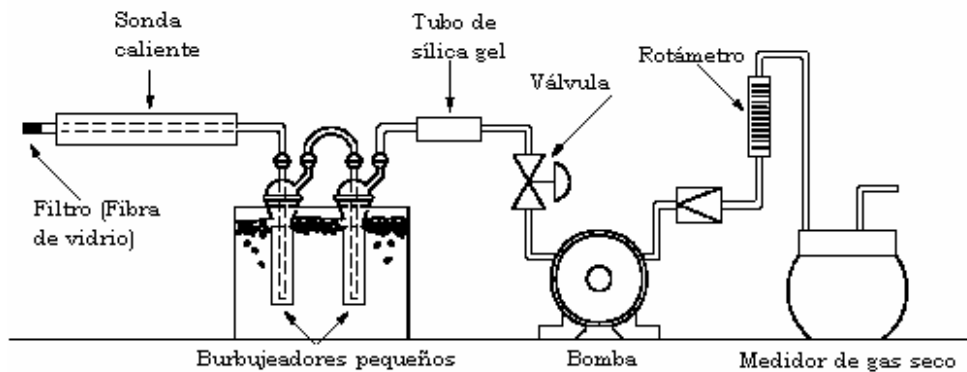


Figura 13. Método aproximado para el muestreo de humedad.

En la cual:

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m^3 .

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m^3 .

B_{wm} = Fracción volumétrica aproximada de vapor de agua en la corriente gaseosa que se pierde en el segundo burbujeador (0.025).

Conocer el contenido de humedad de la corriente gaseosa es importante para determinar la masa molar del gas en la chimenea; y con esta determinar la velocidad y el caudal del gas en la chimenea. También es un parámetro importante para la realización del muestreo isocinético, ya que el porcentaje de isocinetismo depende tanto del porcentaje de humedad de los gases en la chimenea como del tamaño de la boquilla seleccionado para la toma de la muestra, que a su vez depende también del contenido de humedad.

El método de referencia para medir la humedad es el más exacto, pero implica mayor esfuerzo y un tiempo considerable para la toma de muestra, por lo cual es poco utilizado para obtener estimativos de la humedad.

El porcentaje de humedad se puede determinar por comparación con muestreos de fuentes similares, por balances de masa en el proceso,

utilizando la técnica de temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco y una carta psicrométrica, o realizando una determinación preliminar de la humedad.

La técnica de temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco empleada para medir el contenido de humedad en la corriente gaseosa consiste en medir las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (psicrometría). El termómetro de bulbo seco se introduce en la chimenea hasta que alcanza el equilibrio. El otro termómetro, el de bulbo húmedo, es cubierto con una mecha de algodón saturada con agua destilada. Este también se introduce en la chimenea hasta alcanzar el equilibrio. La temperatura de bulbo seco alcanza rápidamente el equilibrio, mientras que la de bulbo húmedo asciende hasta el equilibrio, se nivela y luego aumenta otra vez hasta que la mecha se seca. El punto de inflexión en el cual la temperatura alcanza el equilibrio es considerada la temperatura de bulbo húmedo (ver figura 14)

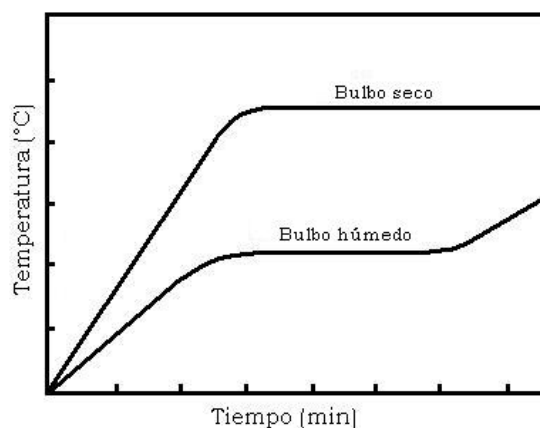


Figura 14. Determinación de las temperaturas de bulbo húmedo y seco.

A temperaturas por debajo de 100 °C, las temperaturas de bulbo húmedo y seco pueden medirse en la corriente gaseosa sin preocupación de que la neblina de ácido sulfúrico este presente y aumente el punto de rocío sustancialmente. Sin embargo, por encima de 100 °C, se pueden tener resultados erróneos debido al secado rápido de la mecha de bulbo húmedo.

Partiendo de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo y la presión absoluta en la chimenea se obtiene el porcentaje de humedad, con la siguiente ecuación:

$$B_{ws} = \frac{P_{H_2O}}{P_s} \quad (21)$$

En la cual:

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

P_{H_2O} = Presión parcial del vapor de agua en la corriente gaseosa, mm Hg.

La presión parcial del vapor de agua en la corriente gaseosa se puede hallar a través de la siguiente ecuación:

$$P_{H_2O} = \frac{P_s \left[1.61 H_{w(tw)} h_{fg(tw)} - 1617.49 (t_d - t_w) \right]}{\left(1 + 1.61 H_{w(tw)} \right) h_{fg(tw)} - 1617.49 (t_d - t_w)} \quad (22)$$

En la cual:

P_{H_2O} = Presión parcial del vapor de agua en la corriente gaseosa, mm Hg.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

$H_{w(tw)}$ = Humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo, kg H₂O / kg aire seco.

$h_{fg(tw)}$ = Entalpía de vaporización del agua a la temperatura de bulbo húmedo, J / kg.

t_d = Temperatura de bulbo seco, °C.

t_w = Temperatura de bulbo húmedo, °C.

La humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo se puede hallar a través de la siguiente ecuación:

$$H_{w(tw)} = \frac{M_w P_{vH_2O(tw)}}{M_a \left(P_s - P_{vH_2O(tw)} \right)} \quad (23)$$

En la cual:

$H_{w(tw)}$ = Humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo, kg
H₂O / kg aire seco.

M_w = Masa molar del agua, 18.0 g / mol.

$P_{vH_2O(tw)}$ = Presión de vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo,
mm Hg.

M_a = Masa molar del aire seco, 28.97 g / mol.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

La presión de vapor de agua en función de la temperatura se puede hallar con una precisión bastante buena a través de la ecuación de Antoine:

$$P_{vH_2O(t)} = e^{\left[18.6008 - \frac{3998.9777}{(t+234.1526)}\right]} \quad (24)$$

En la cual:

$P_{vH_2O(t)}$ = Presión de vapor del agua, mm Hg.

t = Temperatura, °C.

La entalpía de vaporización del agua en función de la temperatura se puede hallar con la ecuación de Echeverri para el intervalo de temperaturas de 0 a 100 °C, que es el valor esperado para las temperaturas de bulbo húmedo:

$$h_{fg(t)} = 2503300 - 2433.2t \quad (25)$$

En la cual:

$h_{fg(t)}$ = Entalpía de vaporización del agua, J / kg.

t = Temperatura, °C.

El porcentaje de humedad también se puede determinar por comparación con muestreos de fuentes similares. La tabla 3 presenta algunos valores para la humedad de los gases de combustión provenientes de dispositivos que utilizan algunos combustibles fósiles.

Tabla 3. Valores a asumir para la humedad.

Combustible	B_{ws}
Crudo de castilla	0.11
Carbón	0.07
Diesel (ACPM)	0.04
Gas natural	0.03

Una vez determinado el porcentaje de humedad de los gases en la chimenea, se puede calcular la masa molar del gas en la chimenea. Para determinar la masa molar del gas en la chimenea es necesario primero determinar la masa molar del gas seco en la chimenea.

$$M_s = (1 - B_{ws})M_d + 18.0B_{ws} \quad (26)$$

En la cual:

M_s = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

M_d = Masa molar del gas seco en la chimenea, g/mol.

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

7. MÉTODO 5: DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO DE FUENTES ESTACIONARIAS.

7.1. PRINCIPIO.

El material particulado es succionado isocinéticamente de la fuente y colectado sobre un filtro de fibra de vidrio que se mantiene a una temperatura de 120 ± 14 °C. El material particulado, que incluye cualquier material que se condensa a la temperatura de filtración, es determinada gravimétricamente después de la remoción del agua no combinada.

Ya que la definición de material particulado no es consistente en todos los casos, el material particulado colectado podría obtenerse al pesar: (1) el filtro, (2) la sonda, (3) los burbujeadores, y (4) el solvente de extracción

para permitir el ajuste de la determinación de material particulado para ser consistente con la regulación aplicable.

7.2. APLICABILIDAD.

Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de material particulado de fuentes fijas o estacionarias.

7.3. SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA BOQUILLA DE MUESTREO.

La selección del diámetro de la boquilla es una decisión muy importante en el muestreo isocinético, ya que el área de la boquilla afecta fuertemente la velocidad de muestreo. Generalmente, los equipos de muestreo para emisiones incluyen un set de varias boquillas intercambiables con diámetros de 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14 y 15 mm (ver figura 14). De este set, la mejor boquilla es aquella que permite el isocinetismo (velocidad del gas en la boquilla de muestreo igual a la velocidad del gas en la chimenea) a un caudal de muestreo aproximadamente igual al caudal de diseño óptimo ($0.0212 \text{ m}^3/\text{min}$).



Boquilla 14. Boquilla de muestreo.

Para seleccionar el diámetro ideal de la boquilla se requiere efectuar un recorrido preliminar, este consiste en medir los siguientes parámetros:

- Presión de velocidad en cada punto.

- Temperatura del gas en la chimenea en cada punto.
- Presión estática.
- Presión barométrica.
- Asumir o determinar el porcentaje de humedad.

Con los datos del recorrido preliminar, se determina el diámetro ideal de la boquilla para el muestreo:

$$D_n = \sqrt{\frac{607.1 Q_m P_m}{T_m C_p (1 - B_{ws})}} \sqrt{\frac{T_s M_s}{P_s \overline{DP}}} \quad (27)$$

En la cual:

D_n = Diámetro de la boquilla, mm.

Q_m = Caudal a través del medidor de gas seco, normalmente 0.0212 m³/min.

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

T_m = Temperatura promedio en el medidor de gas seco, K.

C_p = Coeficiente del tubo pitot.

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

T_s = Temperatura promedio del gas en la chimenea, K.

M_s = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

$\overline{DP}$ = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mm H₂O.

La presión absoluta en la chimenea se puede hallar con la ecuación 5, sin embargo, para ahorrar tiempo se puede asumir igual a la presión atmosférica. De igual forma, la presión absoluta y la temperatura promedio en el medidor de gas seco se pueden asumir iguales a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente respectivamente, ya que la seleccionar el diámetro ideal de la boquilla es el primer paso para la realización del muestreo isocinético.

El valor entregado por la ecuación 27 se deberá aproximar al diámetro de la boquilla existente o disponible más cercano; generalmente se aproxima a la boquilla existente menor.

El procedimiento para seleccionar el diámetro ideal de la boquilla descrito arriba es para muestreadores de chimenea manuales. Para muestreadores automáticos se deben seguir las instrucciones del menú.

8. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO.

El siguiente es el procedimiento general de muestreo. Algunos de los pasos no se requieren para muestreadores de chimenea automáticos.

8.1. PREPARACIÓN PRELIMINAR.

8.1.1. Pesar el primer y segundo burbujeador con 100 mL de agua destilada cada uno.

8.1.2. Pesar el tercer burbujeador vacío.

8.1.3. Pesar el cuarto burbujeador con 200 g de sílica gel activada.

8.1.4. Revisar el filtro a utilizar, desecarlo durante 24 horas y pesarlo con una precisión de 0.1 mg.

8.1.5. Pesar el ciclón y el erlenmeyer (si es necesario). Este procedimiento en la preparación corresponde al utilizado para un muestreo de material particulado únicamente. En caso de realizar un muestreo de óxidos de azufre, los líquidos contenidos en los burbujeadores cambian.

8.2. TOMA DE MUESTRA.

8.2.1. Armar el equipo de muestreo y todas sus conexiones.

8.2.2. Realizar la prueba de fugas. En el procedimiento de la prueba de fugas se debe tapar la entrada de gases en la boquilla, abrir completamente la válvula de ajuste fino, cerrar la válvula de ajuste grueso y prender la bomba de vacío (para muestreadores de chimenea manuales). Abrir la válvula de ajuste grueso hasta que el indicador de vacío señale 380 mm H₂O. Si el medidor de gas seco no varía más de 0.00057 m³/min se considera que no hay fugas al

iniciar el muestreo. En caso contrario se deben revisar todas las conexiones hasta que desaparezcan las fugas.

Posteriormente se destapa lentamente la entrada de la boquilla y se apaga la bomba. Si es un equipo automático, se deben seguir las instrucciones del menú.

- 8.2.3. Conectar el sistema de calentamiento de la sonda y la caja caliente. La temperatura de la caja caliente debe permanecer en 120 ± 14 °C.
- 8.2.4. Anotar la lectura inicial del medidor de gas seco (para muestreadores de chimenea manuales).
- 8.2.5. Nivelar la consola y colocar en cero (0) los manómetros (para muestreadores de chimenea manuales).
- 8.2.6. Colocar la sonda en el interior de la chimenea en el primer punto de muestreo.
- 8.2.7. Definir el tiempo de muestreo para cada punto. El tiempo total de muestreo no debe ser menor de 1 hora.
- 8.2.8. Calcular la caída de presión en el medidor de orificio con la siguiente ecuación (para muestreadores de chimenea manuales).

$$\Delta H = K \frac{T_m}{T_s} \Delta P \quad (28)$$

En la cual:

ΔH = Caída de presión en el medidor de orificio, mm H₂O.

K = Factor de proporcionalidad que relaciona ΔP y ΔH para el muestreo isocinético (ecuación 29).

T_m = Temperatura en el medidor de gas seco, K.

T_s = Temperatura del gas en la chimenea, K.

ΔP = Presión de velocidad del gas en la chimenea, mm H₂O.

El factor de proporcionalidad que relaciona las dos presiones de velocidad (P y H), de modo que la velocidad en la boquilla sea la misma que la velocidad en la chimenea esta dado por:

$$K = 8.038 \times 10^{-5} C_p^2 DH_{@} D_n^4 (1 - B_{ws}) \frac{M_d}{M_s} \frac{P_s}{P_m} \quad (29)$$

En la cual:

C_p = Coeficiente del tubo pitot.

$DH_{@}$ = Coeficiente del medidor de orificio, mm H₂O.

D_n = Diámetro de la boquilla, mm.

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

M_d = Masa molar del gas seco en la chimenea, g/mol.

M_s = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

En los muestreadores de chimenea automáticos, la caída de presión en el medidor de orificio (H) es calculada automáticamente por el muestreador simultáneamente con el caudal de succión.

- 8.2.9. Encender la bomba de succión simultáneamente con el cronómetro e inmediatamente ajustar el caudal con las válvulas de control hasta que el valor de H coincida con el valor calculado.

La caída de presión en el medidor de orificio y el caudal de succión, en muestreadores de chimenea manuales, se debe hacer en el menor tiempo posible para garantizar un muestreo isocinético.

- 8.2.10. Mantener la temperatura del gas en el último burbujeador en 20 °C.

- 8.2.11. Para cada punto se lee la presión de velocidad, la temperatura del gas en la chimenea y la temperatura en el medidor de gas. Llevando estos datos a la ecuación 28 se obtiene la caída de presión en el orificio (ΔH) que es una medida indirecta del caudal a través del medidor de gas seco (para muestreadores de chimenea manuales). La caída de presión en el orificio se consigue en la consola mediante la manipulación de las válvulas de control fino y grueso.

$$Q_m = K_m \sqrt{\frac{T_m \Delta H}{P_m M_m}} \quad (30)$$

En la cual:

Q_m = Caudal a través del medidor de gas seco, m³/min.

K_m = Coeficiente en el medidor de orificio (0.01837).

T_m = Temperatura en el medidor de gas seco, K.

ΔH = Caída de presión en el medidor de orificio, mm H₂O.

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

M_m = Masa molar del gas seco en el medidor, g/mol.

- 8.2.12. Una vez obtenida la caída de presión en el orificio, se efectúa el muestreo durante 3 a 5 minutos por punto (dependiendo del número de puntos) y se registran los siguientes datos (para muestreadores de chimenea manuales):

ΔP = Presión de velocidad del gas en la chimenea, mm H₂O.

T_m = Temperatura en el medidor de gas seco, K.

T_s = Temperatura del gas en la chimenea, K.

ΔH = Caída de presión en el medidor de orificio, mm H₂O.

P_e = Presión estática en la chimenea, in H₂O.

- 8.2.13. Para terminar el muestreo se cierra la válvula de control grueso, se apaga la bomba de succión y así como los demás suiches. Registrar el volumen final del medidor de gas seco (para muestreadores de chimenea manuales).

8.2.14. Al final del muestreo se debe realizar nuevamente la prueba de fugas.

8.3. OPERACIONES POSTERIORES AL MUESTREO.

Una vez finalizado el muestreo se realizan las siguientes operaciones:

8.3.1. Se remueve la sonda y se cierran todas las aberturas existentes en la sonda, portafiltro y burbujeadores.

8.3.2. Se pesan los burbujeadores y el filtro (previamente dispuesto en un desecador por 24 horas).

8.3.3. Remover en un beaker el material particulado depositado en el interior de la boquilla, la sonda y el ciclón utilizando una mezcla de acetona (o alcohol) y agua destilada. Rotular las muestras y llevar al laboratorio para el análisis de sólidos totales.

8.4. CÁLCULOS Y PRESENTACIÓN DEL INFORME.

Se hacen los cálculos y se presenta el informe de acuerdo a lo descrito y exigido por la normatividad del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, o las Corporaciones Autónomas Regionales (Colombia).

8.4.1. Presión absoluta del gas en la chimenea (para muestreadores de chimenea manuales).

$$P_s = P_a + \frac{P_e}{13.6} \quad (31)$$

En la cual:

P_s = Presión absoluta del gas en la chimenea, mm Hg.

P_a = Presión barométrica, mm Hg.

P_e = Presión estática promedio en la chimenea, mm H₂O.

8.4.2. Presión absoluta en el medidor de gas seco (para muestreadores de chimenea manuales).

$$P_m = P_a + \frac{\overline{DH}}{13.6} \quad (32)$$

En la cual:

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

P_a = Presión barométrica, mm Hg.

$\overline{DH}$ = Presión diferencial promedio a través del orificio, mm H₂O.

8.4.3. Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia.

$$V_{mref} = V_m Y \frac{P_m T_{ref}}{P_{ref} T_m} \quad (33)$$

En la cual:

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m³.

V_m = Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, m³.

Y = Factor de calibración del medidor de gas seco.

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

T_m = Temperatura promedio en el medidor de gas seco, K.

8.4.4. Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia.

$$V_{wref} = \left[(V_f - V_i) r_w + (W_f - W_i) \right] \frac{R T_{ref}}{P_{ref} M_w} \quad (34)$$

En la cual:

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m³.

V_f = Volumen final de agua en los tres primeros burbujeadores, mL.
 V_i = Volumen inicial de agua en los tres primeros burbujeadores, mL.
 W_f = Peso final de la silica gel o del último burbujeador, g.
 W_i = Peso inicial de la silica gel o del último burbujeador, g.
 r_w = Densidad del agua, 0.9982 g/mL.
 R = Constante de los gases ideales, 0.06236 mm Hg m³/mol K.
 T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.
 P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.
 M_w = Masa molar del agua, 18.0 g/mol.

Si en lugar de medir los volúmenes inicial y final de agua en los tres primeros burbujeadores, estos se pesan para determinar la cantidad de agua recolectada, la ecuación 34 se modifica de esta manera:

$$V_{wref} = (P_f - P_i) \frac{R T_{ref}}{P_{ref} M_w} \quad (35)$$

En la cual:

P_f = Peso final de agua en todos los burbujeadores, g.
 P_i = Peso inicial de agua en todos los burbujeadores, g.
 R = Constante de los gases ideales, 0.06236 mm Hg m³/mol K.
 T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.
 P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.
 M_w = Masa molar del agua, 18.0 g/mol.

8.4.5. Contenido de humedad de los gases en la chimenea.

$$B_{ws} = \frac{V_{wref}}{V_{wref} + V_{mref}} \quad (36)$$

En la cual:

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m³.

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m³.

8.4.6. Masa molar del gas seco en la chimenea

$$M_d = 0.44(\%CO_2) + 0.32(\%O_2) + 0.28(\%CO + \%N_2) \quad (37)$$

En la cual:

M_d = Masa molar del gas seco en la chimenea, g/mol.

8.4.7. Masa molar del gas en la chimenea.

$$M_s = (1 - B_{ws})M_d + 18.0 B_{ws} \quad (38)$$

En la cual:

M_s = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

M_d = Masa molar del gas seco en la chimenea, g/mol.

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

8.4.8. La velocidad del gas en la chimenea.

$$V_s = K_p C_p \sqrt{\frac{DP T_s}{P_s M_s}} \quad (39)$$

En la cual:

V_s = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s.

K_p = Constante del tubo pitot (34.97).

C_p = Coeficiente del tubo pitot.

$\overline{DP}$ = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mm H₂O.

T_s = Temperatura promedio del gas en la chimenea, K.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

M_s = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

8.4.9. Área de la sección transversal de la boquilla.

$$A_n = p \left(\frac{D_n}{2} \right)^2 \quad (40)$$

En la cual:

A_n = Área de la sección transversal de la boquilla, m².

D_n = Diámetro de la boquilla, m.

8.4.10. Porcentaje de isocinetismo.

$$I = \frac{100 P_{ref} T_s V_{mref}}{60 P_s T_{ref} V_s A_n f (1 - B_{ws})} \quad (41)$$

En la cual:

I = Porcentaje de isocinetismo.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

T_s = Temperatura promedio del gas en la chimenea, K.

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m³.

P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

V_s = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s.

A_n = Área de la sección transversal de la boquilla, m².

f = Tiempo total de muestreo, min.

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

Para garantizar que la muestra es tomada a la misma velocidad con la cual se transportan los gases en la chimenea, el porcentaje de isocinetismo deberá estar entre 90 y 110%. De no ser así, el muestreo es considerado no representativo y se deberá repetir.

8.4.11. Área de la chimenea.

Para chimeneas circulares:

$$A_s = p \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 \quad (42)$$

En la cual:

A_s = Área de la chimenea, m².

D_s = Diámetro de la chimenea, m.

Para chimeneas rectangulares:

$$A_s = L W \quad (43)$$

En la cual:

L = Largo de la chimenea, m.

W = Ancho de la chimenea, m.

8.4.12. Caudal de gas en la chimenea en base seca a condiciones de referencia.

$$Q_{sref} = 3600 (1-B_{ws}) V_s A_s \frac{T_{ref}}{T_s} \frac{P_s}{P_{ref}} \quad (44)$$

En la cual:

Q_{sref} = Caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia, m³/h.

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

V_s = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m / s.
 A_s = Área de la chimenea, m².
 T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.
 P_s = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.
 T_s = Temperatura promedio del gas en la chimenea, K.
 P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

8.4.13. Concentración de partículas a condiciones de referencia.

$$C_{pref} = \frac{W_p}{V_{mref}} \quad (45)$$

En la cual:

C_{pref} = Concentración de partículas en el gas de la chimenea (en base seca) a condiciones de referencia, g / m³.
 W_p = Masa total de las partículas colectadas, g.
 V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m³.

8.4.14. Emisión de partículas.

$$E_p = 0.001 C_{pref} Q_{sref} \quad (46)$$

En la cual:

E_p = Emisión de partículas, kg / h.
 C_{pref} = Concentración de partículas en el gas de la chimenea (en base seca) a condiciones de referencia, g / m³.
 Q_{sref} = Caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia, m³ / h.

9. BIBLIOGRAFÍA.

Campillo V., Nora Análisis de Agua-Aire. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 1993.

- Molina P., Francisco. Muestreo Isocinético de Material Particulado. Universidad de Antioquia. Medellín, 1990.
- Ayres, Gilbert. Análisis Químico Cuantitativo. Editorial Harla. México, 1970.
- U.S. EPA Reference Methods for Emission Testing. EPA CFR40 PART 60, Appendix A. Reference Methods Listing.
- AST Sampler User's Manual. Andersen Instruments Incorporated. Graseby. Smyrna, 1995.
- MST Sampler User's Manual. Andersen Instruments Incorporated. Graseby. Smyrna, 1995.
- Smith, J. M. y Van Ness, H. C. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. Mc Graw-Hill. México, 1990.
- Echeverri L., Carlos. Muestreo Isocinético de Material Particulado. Universidad de Antioquia. Medellín, 1997.
- Acevedo G., Carlos. Porcentaje de Humedad en Ductos y Chimeneas. Revista Contaminación Ambiental N° 12. Universidad Pontifica Bolivariana. Medellín, 1983.
- Wight, Gregory. Fundamentals of Air Sampling. Lewis Publishers. Florida, 1994.
- Yergovich, T. Programed Stack Calculator Instruction Book. TWY Co. California, 1994.
- Liu, D., Lipták, B. y Bouis, P. Environmental Engineers' Handbook. Florida: Lewis Publishers, 1997.
- Corbitt, R. Manual de Referencia de la Ingeniería Ambiental. Madrid: Mc Graw-Hill, 2003.