

DESCRIPCIÓN MÉTODO ISOCINÉTICO

ANEXO 9

PROPUESTA DE UNA ESTRATEGIA PERIÓDICA DE CARACTERIZACIÓN
FISICOQUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ CON
EL FIN DE CONTRIBUIR EN LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.



Tabla de contenido

1. ISOCINETICO	2
1.1 Objetivo	2
1.2 Aplicabilidad.....	2
1.3 Resumen del método.....	2
1.4 Elementos contributivos	3
1.5 Verificación	4
1.5.1 Verificación de la Consola de Muestreo.....	4
1.5.2 Verificación Constante de Calibración del Equipo (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2003).....	4
1.6 Procedimiento	10
1.6.1 Método 1: Localización de los puntos de muestreo	10
1.6.2 Método 2: Determinación de la velocidad dl gas en la chimenea y el caudal (Tubo pitot tipo S)	15
1.6.3 Método 3: Determinación de la masa molar del gas	20
1.6.4 Método 4: Determinación del contenido de humedad en los gases de la chimenea	22
1.6.5 Método 5: Determinación de la emisión de material particulado de fuentes estacionarias.....	24
2. BIBLIOGRAFIA	26

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Tren de muestreo isocinético para material particulado.....	3
Ilustración 2. Burbujedores de la caja fría.....	6
Ilustración 3. Descripción distancias del cabezal de succión al tubo pitot tipo “S”.....	10
Ilustración 4. Preparación del punto de muestreo- Esquema de instalación.	12
Ilustración 5. Número mínimo de puntos de muestreo.....	13
Ilustración 6. Ubicación de los puntos de muestreo.	15
Ilustración 7. Sección transversal de una chimenea rectangular dividida en 12 áreas iguales con puntos de muestreo centrado en cada área.....	15

Ilustración 8. Tubo pitot.	16
Ilustración 9. Medición de las presiones absoluta (Ps), estática (Pe) y la de velocidad (ΔP).	17
Ilustración 10. Aparato Orsat para analizar gases de combustión.....	20
Ilustración 11. Boquilla de muestreo.....	25

Tabla de Tablas

Tabla 1. Elementos constitutivos del método isocinético.....	3
Tabla 2. Pasos para la verificación del tubo pitot S.....	8
Tabla 3. Pasos para la verificación de distancias de la termocupla, boquilla y tubo pitot tipo S, al cabezal de succión	9
Tabla 4. Número de puntos de travesía sobre el diámetro.	14
Tabla 5. Arreglo de la sección transversal para chimeneas rectangulares.....	14
Tabla 6. Métodos para determinar el contenido de humedad del gas de chimenea.	22

MUESTREO FUENTES

1. ISOCINÉTICO

1.1 OBJETIVO

Establecer los lineamientos necesarios para garantizar la calidad en la toma de muestras y cálculos de concentración de material particulado en fuentes fijas de emisión (Método EPA).

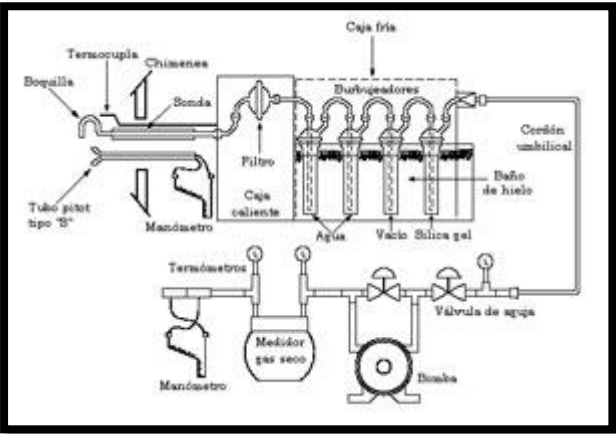
1.2 APLICABILIDAD

Este método es aplicable para la toma de muestras de material particulado en fuentes fijas de manera adecuada para la posterior determinación de concentración de PM10 y análisis químico.

1.3 RESUMEN DEL MÉTODO

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 cuyo esquema básico se encuentra en la Ilustración 1.

Ilustración 1. Tren de muestreo isocinético para material particulado.



Fuente: (Londoño, 2006)

1.4 ELEMENTOS CONTRIBUTIVOS

En la Tabla 1 se muestran los elementos necesarios para llevar a cabo el método isocinético.

Tabla 1. Elementos constitutivos del método isocinético.

	Consola de Control y Bomba de Vacío
	Sonda térmica de muestreo
	Caja térmica porta filtro

Impactadores

1/2"		Dn = 12,70 mm An = 126,67 mm ²
7/16"		Dn = 11,11 mm An = 96,99 mm ²
3/8"		Dn = 9,52 mm An = 71,25 mm ²
5/16"		Dn = 7,93 mm An = 49,48 mm ²
1/4"		Dn = 6,35 mm An = 31,66 mm ²
3/16"		Dn = 4,76 mm An = 17,81 mm ²
1/8"		Dn = 3,17 mm An = 7,91 mm ²

Juego de Boquillas

Fuente. (Morales, 2010).

1.5 VERIFICACIÓN

1.5.1 VERIFICACIÓN DE LA CONSOLA DE MUESTREO

1. Verifique el serial de la consola, bomba y del DGM.
2. Revisar que las mangueras no presentan material particulado al interior, de ser así solicite su limpieza.

1.5.2 VERIFICACIÓN CONSTANTE DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO (ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ, 2003)

Calculo de Y_c y verificación con un orificio crítico. Siguiendo este procedimiento:

1. Verifique el serial de la bomba, con el fin de establecer que corresponda al equipo revisado.
2. Encender el interruptor de encendido de la bomba por un tiempo de 10 minutos, con el fin de calentarla.
3. La prueba debe ser realizada a una caída de presión constante, que está dada por el $\Delta H@$ de calibración, establecido en la revisión del equipo.

4. Después de los 10 minutos verifique que se registró la lectura inicial del medidor de gas seco “DGM” (Ft³ o m³).
5. Registre la temperatura inicial de entrada y salida del medidor de gas seco (°C o °F).
6. Durante un periodo de 10 minutos, deje succionar el equipo libremente (sin orificio crítico).
7. Cumplido el tiempo apague la bomba.
8. Registre la lectura final del medidor de gas seco DGM (Ft³ o m³).
9. Registre las temperaturas finales de entrada y salida del DGM (°C o °F).
10. Verifique mediante la siguiente ecuación la constante de calibración.

Ecuación 1. Constante de calibración.

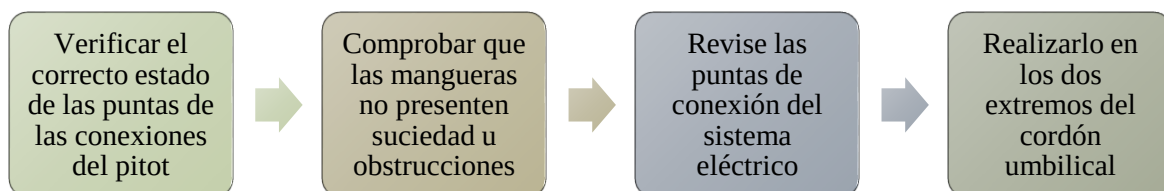
$$Y_c = \frac{10}{V_m} \left(\frac{0.0319 T_m}{P_{bar}} \right)^{1/2}$$

11. Verifique que el rango se encuentra dentro de los siguientes valores $0.97 Y < Y_c < 1.03 Y$
12. Si la verificación Y_c se encuentra dentro del rango, continúe con la revisión de los demás componentes.
13. Si el Y_c , se encuentra fuera del rango, solicite realizar los ajustes necesarios.
14. Si se llevó a cabo el numeral 13, solicite se realicen los pasos del 1 al 12.
15. Si se encuentra fuera del rango del numeral 12, por tres ocasiones, realice calibración empleado los orificios críticos.
16. Verifique Y empleando un orificio crítico. El valor obtenido para Y debe estar en el rango 1.00 ± 0.2 . Si Y no ingresa en el rango, haga los ajustes necesarios y repita para ese orificio crítico. Verifique con los demás orificios críticos.
17. Si el equipo cumple las especificaciones de calibración en todos los puntos, tome los valores obtenidos y continúe con el muestreo.
18. Si el equipo no cumple las especificaciones de calibración en todos los puntos, se suspende el muestreo.

1.5.2.1 Verificación de cordón umbilical

El proceso de verificación del cordón umbilical se debe hacer siguiendo los pasos de la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo para la verificación del cordón umbilical.



1.5.2.2 Verificación tren de muestreo (Daphia LTDA, 2011)

A continuación, se presenta el procedimiento a realizar en cada uno de los componentes del tren de muestreo.

Caja fría

En la Figura 2 se observan paso a paso como se debe realizar el procedimiento de verificación de la vidriería de la caja fría.

Figura 2. Diagrama para el proceso de verificación de la caja fría.

Verifique cada uno de los burbujeador, con el fin de confirmar que no presenten fisuras en su contorno y que se encuentren limpios

Verificar que el primero, tercero y cuarto burbujeador, son del tipo de diseño Greenburg-Smith modificado.

Verifique que el vástago del tubo de vidrio tiene un diámetro interno ID 1,3 cm (1/2 pulgadas) y mida que el extremo del tubo de vidrio está a una distancia del fondo de 1,3 cm (1/2 pulgadas)

El segundo burbujeador es del tipo Greenburg-Smith estándar y verifique la existencia

Verifique el color de la sílica gel (azul claro u otro material desecante)

En la Ilustración 2 se presentan la descripción de las medidas de los burbujeadores descrita anteriormente.

Ilustración 2. Burbujeadores de la caja fría.

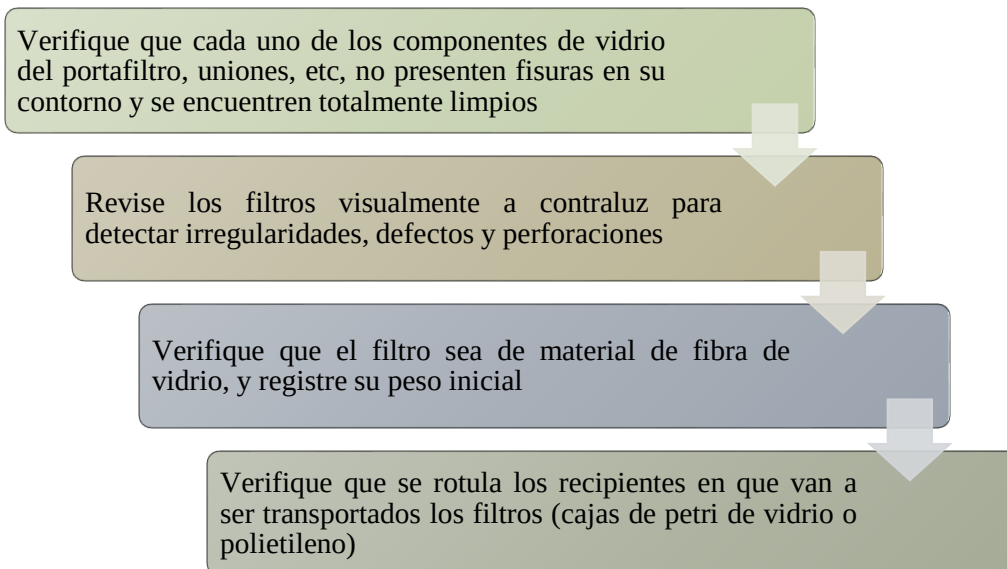


Fuente: (Daphia LTDA, 2011)

Caja caliente

En la Figura 3 se observan paso a paso como se debe realizar el procedimiento de verificación de la caja caliente.

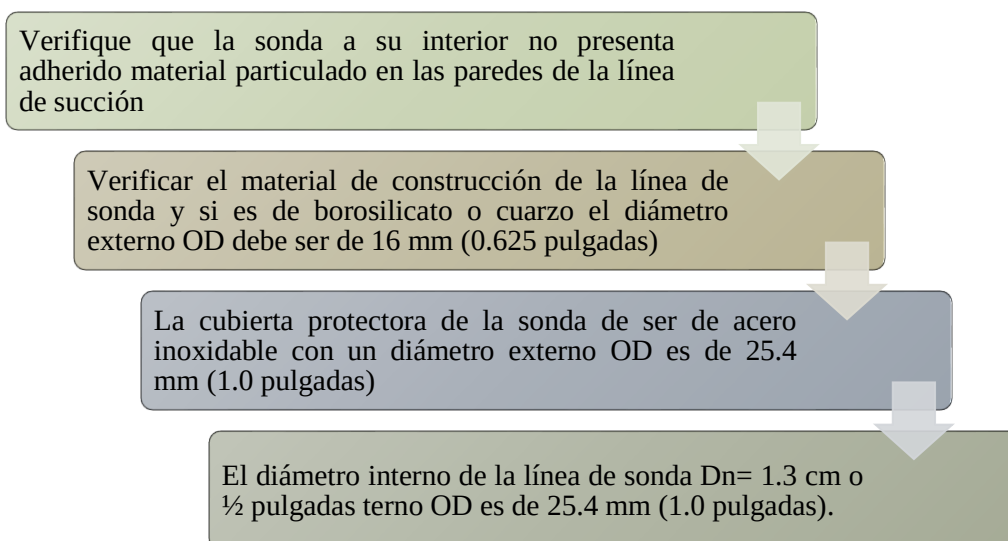
Figura 3. Diagrama para verificación de la caja caliente.



Sonda

En la Figura 4 se observan paso a paso como se debe realizar el procedimiento de verificación de la sonda.

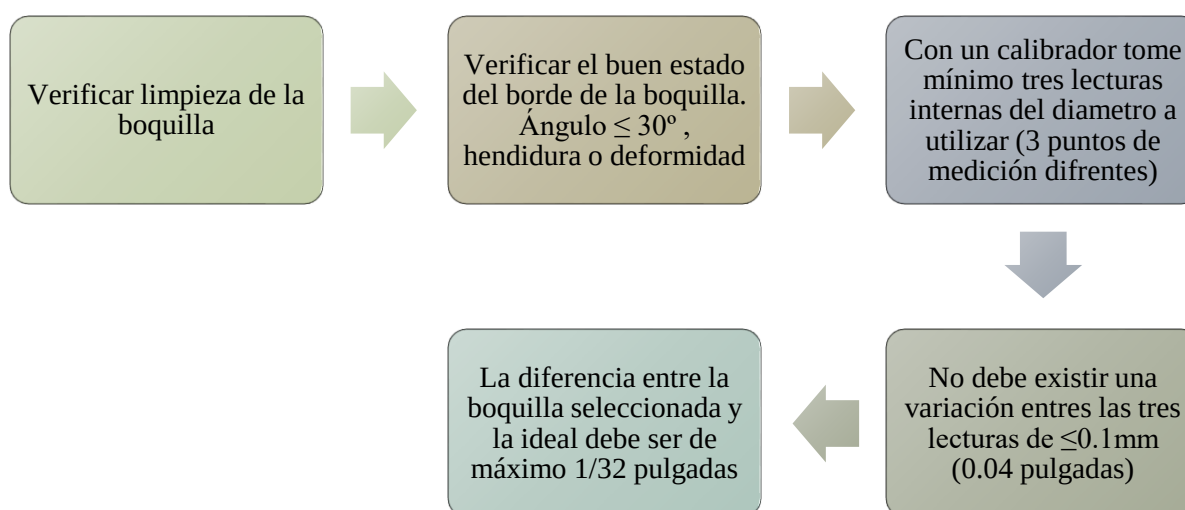
Figura 4. Diagrama para la verificación de la sonda.



Boquillas empleadas

En la Figura 5 se observan paso a paso como se debe realizar el procedimiento de verificación de las boquillas empleadas.

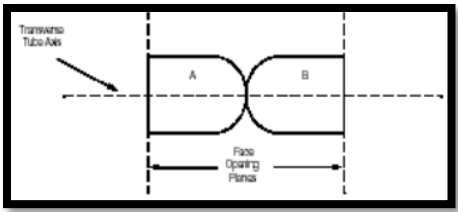
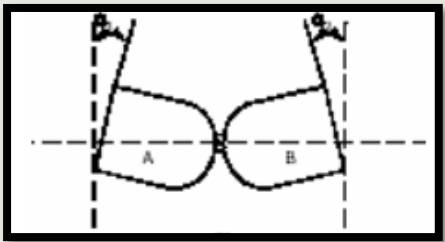
Figura 5. Diagrama para la verificación de las boquillas empleadas.

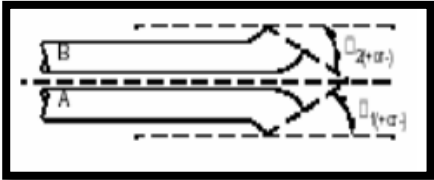
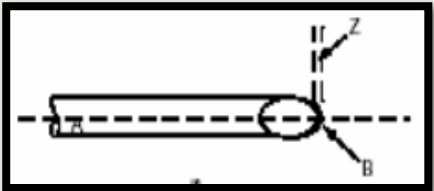


Verificación de tubo pitot tipo S

En la Tabla 2 se presentan las verificaciones a seguir en la geometría de un tubo pitot tipo S.

Tabla 2. Pasos para la verificación del tubo pitot S.

<p>1. Verifique que las distancias entre las caras del tubo pitot tipo “S”, están en el rango de $(1.05 Dt \leq P \leq 1.50 Dt)$.</p>	
<p>2. Constante que el ángulo lateral entre caras este en el rango $\alpha \leq 10^\circ$.</p>	

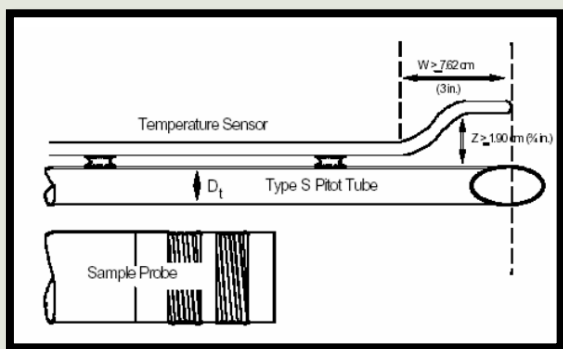
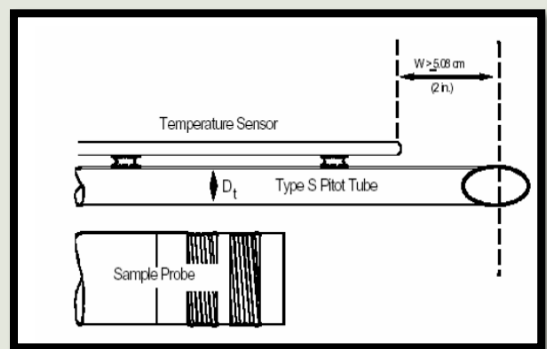
3. Verifique que el ángulo frontal entre caras este en el rango $\beta \leq 5^\circ$.	
4. Verifique que no exista abolladura de punta mayor a $Z \leq 0.32$ cm (1/8 Pulgadas)	
5. Confirme que no existen torcedura de una rama mayor a $W \leq 0.08$ cm (1/32 pulgadas)	

Fuente: (Alcaldia Mayor de Bogotá, 2003)

Verificación de distancias de la termocupla, boquilla y tubo pitot, al cabezal de succión

En la Tabla 3 se resumen la verificación de las distancias de la termocupla, boquilla y tubo pitot tipo S, al cabezal de succión.

Tabla 3. Pasos para la verificación de distancias de la termocupla, boquilla y tubo pitot tipo S, al cabezal de succión

CUANDO EL SENSOR DE TEMPERATURA DE CHIMENEA ES TIPO “S”	CUANDO EL SENSOR DE TEMPERATURA DE CHIMENEA ES TIPO PLANO
	
1. Distancias del tubo pitot tipo “s” al sensor de temperatura de chimenea $Z \geq 1.90$ cm (3/4 pulgadas).	1. Distancia de la entrada del pitot tipo “S” al sensor de temperatura de chimenea $W \geq 5.08$ cm (2 pulgadas).

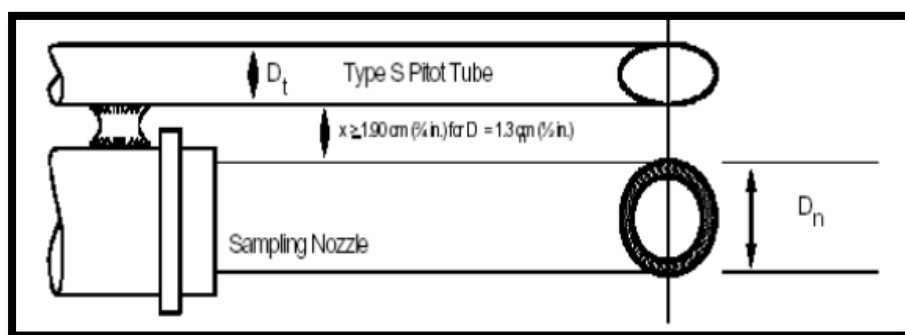
2. Distancia de la entrada del pitot tipo "S" al sensor de temperatura de chimenea $W \geq 7.62$ cm (3 pulgadas).

Fuente: (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2003)

Verificación de distancias del cabezal de succión al tubo pitot tipo "S"

Verifique que la distancia entre la línea de sonda y el tubo tipo pitot "S" es mayor o igual a 1.90 cm (3/4 pulgadas), para diámetros internos de pitot de 1.3 cm (1/2 pulgadas).

Ilustración 3. Descripción distancias del cabezal de succión al tubo pitot tipo "S".



Fuente: (Daphia LTDA, 2011)

Verificación de termocuplas de chimenea, filtro, ultimo burbujeado (exit), medidor y auxiliar (temperatura ambiente) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2003)

Este proceso se realiza en tres puntos de referencia diferentes, de acuerdo al rango de operación esperado. Las pruebas descritas deberán realizarse mediante contraste con un termómetro de Mercurio Hg calibrado, con sensibilidad de 1°C y rango de 0°C a 250°C.

La lectura de calibración de la termocupla de chimenea debe estar dentro de ± 1.5 % de la temperatura mínima absoluta del gas de chimenea. Para el caso del compartimiento de calentamiento del filtro, la diferencia entre las temperaturas registradas del termómetro de mercurio y la pantalla de la consola, debe estar dentro de $\pm 3^\circ\text{C}$ (5.4°F); para otras locaciones del tren de muestreo deben estar dentro de $\pm 1^\circ\text{C}$ (2°F).

1.6 PROCEDIMIENTO

1.6.1 MÉTODO 1: LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

1.6.1.1 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.

1.6.1.2 APLICABILIDAD

Este método es aplicable para corrientes de gas que fluyen en ductos y chimeneas. El método no puede ser usado cuando (Londoño, 2006):

1. El flujo 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.
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

1.6.1.3 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 (IDEAM, 2011).

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

Ecuación 2. Diámetro equivalente.

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

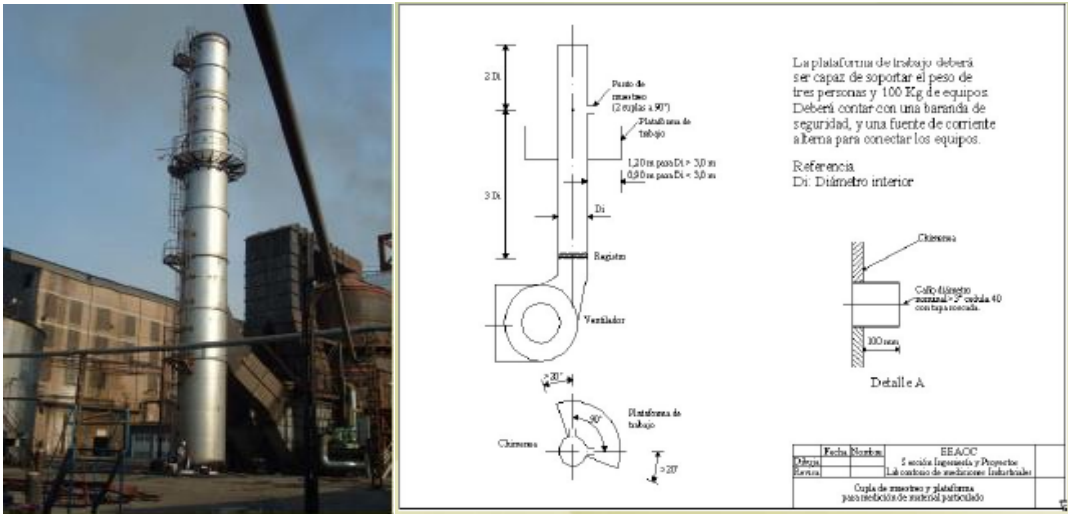
En la cual L y W son las dimensiones (largo y ancho) de la sección transversal de la chimenea.

1.6.1.4 ADECUACIÓN DEL SITIO

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

- Que la plataforma sea amplia y resistente como se describe en la Ilustración 4.
- 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.

Ilustración 4. Preparación del punto de muestreo- Esquema de instalación.



Fuente: (Morales, 2010)

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.

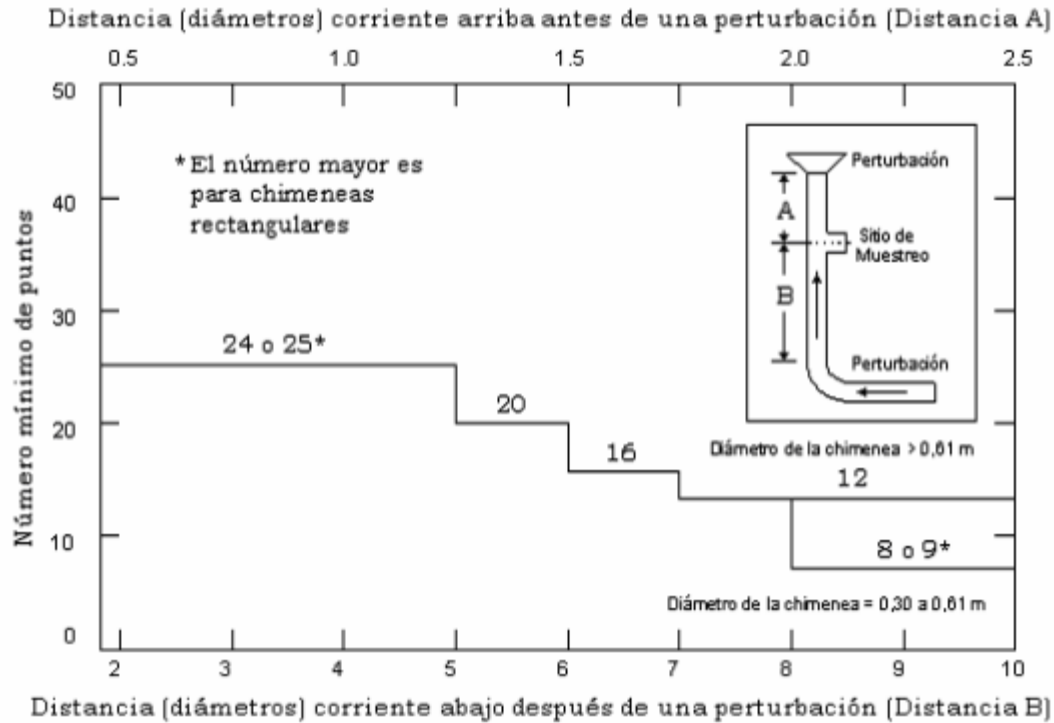
Para ductos rectangulares se divide el ducto en áreas iguales (mínimo 9) y se muestrea en los puntos medios de dichas áreas como se muestra en la Ilustración 7. Para ductos rectangulares se recomienda construir la plataforma según las normas de montaje ya establecidas. El total de puntos a muestrear se determina a través de la

Ilustración 5.

Para usar la

Ilustración 5, 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.

Ilustración 5. Número mínimo de puntos de muestreo.



Fuente: (Londoño, 2006)

Luego, se selecciona de la Ilustración 5, 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.

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 4 (ver

Ilustración 6).

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 5. La relación entre la longitud y el ancho de cada área elemental debe estar entre uno y dos.

Tabla 4. 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.

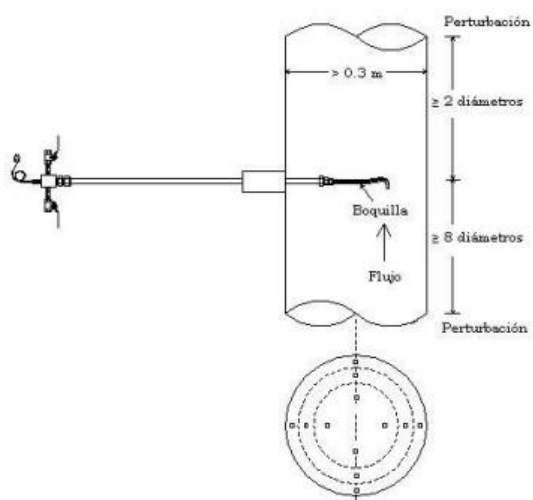
Fuente: (Londoño, 2006).

Tabla 5. 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

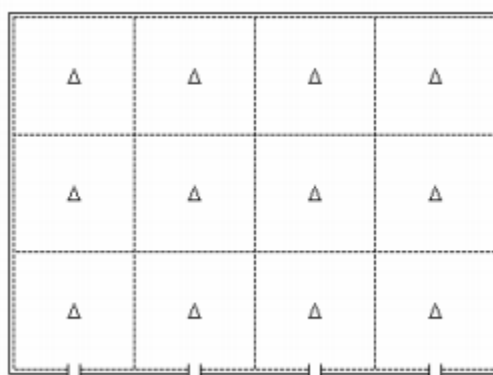
Fuente: (Londoño, 2006).

Ilustración 6. Ubicación de los puntos de muestreo.



Fuente: (Morales, 2010).

Ilustración 7. Sección transversal de una chimenea rectangular dividida en 12 áreas iguales con puntos de muestreo centrado en cada área.



Fuente: (Londoño, 2006).

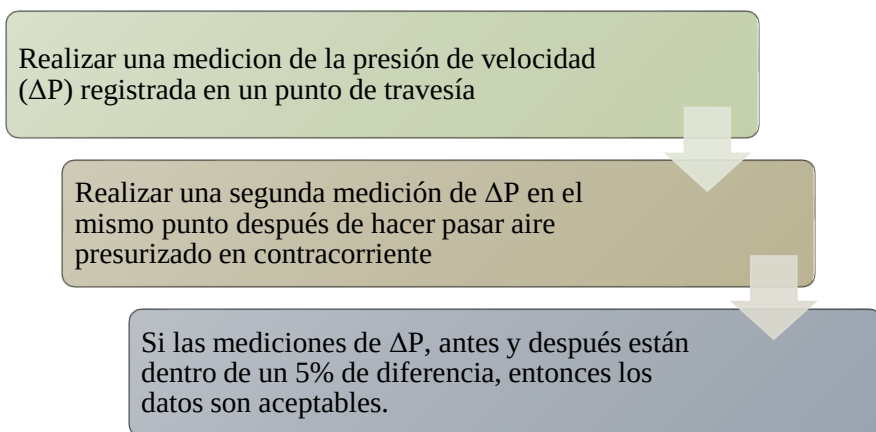
1.6.2 MÉTODO 2: DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DL GAS EN LA CHIMENEA Y EL CAUDAL (TUBO PITOT TIPO S)

1.6.2.1 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”.

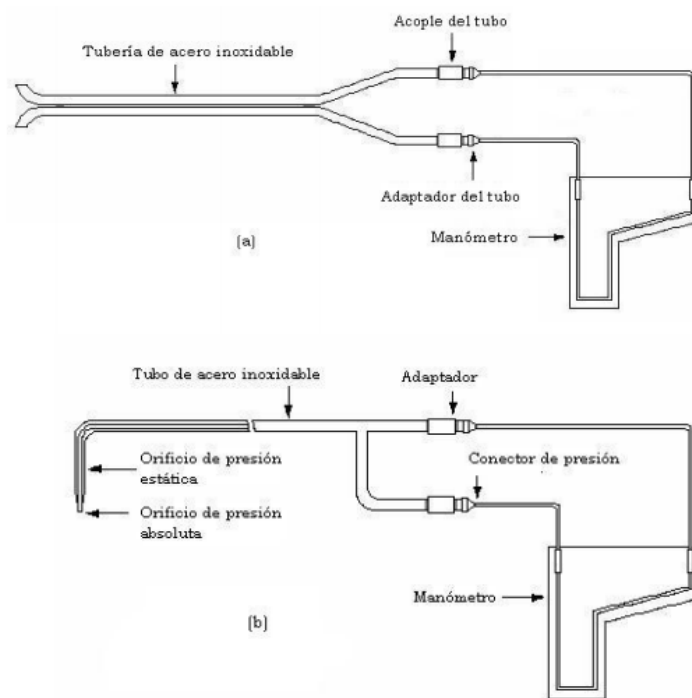
El tubo pitot estándar puede usarse en lugar de uno tipo “S”, sin embargo, como los orificios de presión estática y absoluta del tubo pitot estándar son susceptibles a obstruirse por las partículas presentes en la corriente gaseosa; siempre que se utilice un tubo pitot estándar para realizar una travesía, se debe inspeccionar el tubo pitot para asegurarse que los orificios no se han tapado durante la medición de la siguiente manera:

Figura 6. . Diagrama de flujo de limpieza de orificios de presión estática y absoluta del tubo pitot estándar.



En la Ilustración 8, 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.

Ilustración 8. Tubo pitot.

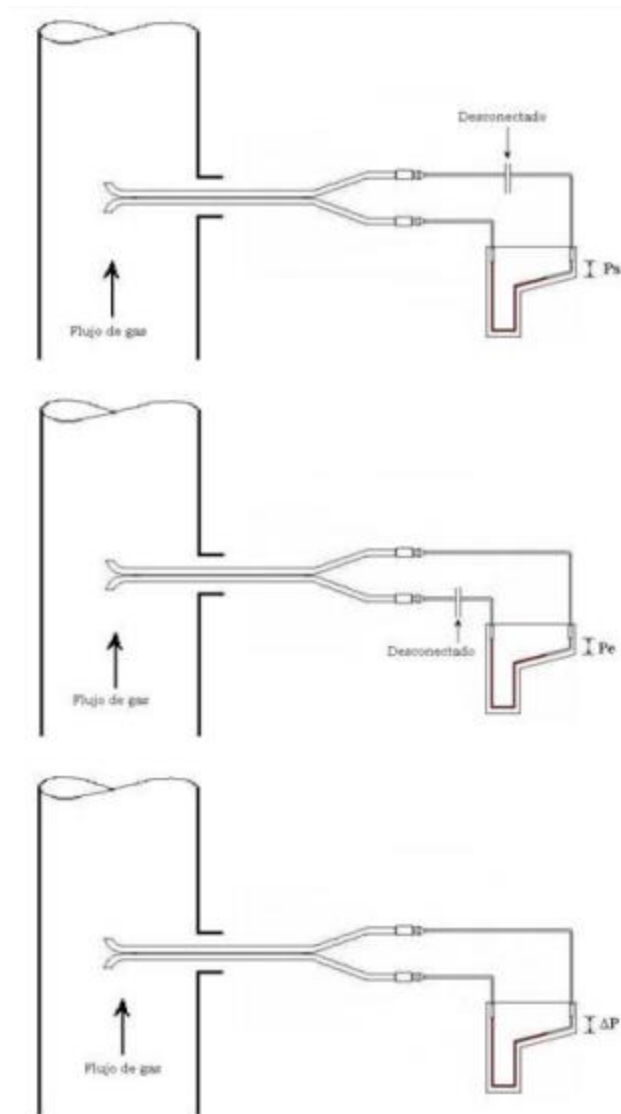


Fuente: (Londoño, 2006).

1.6.2.2 APLICABILIDAD

Este método es aplicable para medir la velocidad promedio de una corriente de gas y para cuantificar el caudal de gas. La Ilustración 9 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.

Ilustración 9. Medición de las presiones absoluta (P_s), estática (P_e) y la de velocidad (ΔP).



Fuente: (Londoño, 2006)

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

Ecuación 3. Velocidad del gas en la chimenea.

$$Vs = KpCp \sqrt{\frac{\Delta P Ts}{Ps Ms}}$$

En la cual:

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

Kp = Constante del tubo pitot (34.97).

Cp = Coeficiente del tubo pitot.

ΔP = 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:

Ecuación 4. Presión de velocidad del gas.

$$\Delta P = \left(\frac{\sum \sqrt{\Delta P_i}}{n} \right)^2$$

En la cual:

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

ΔP_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:

Ecuación 5. Presión absoluta del gas.

$$P_s = P_a + \frac{P_e}{13.6}$$

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.

Para determinar la masa molar del gas en la chimenea se requiere de los métodos 3 y 4 (Londoño, 2006).

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

Ecuación 6. Caudal de gases en la chimenea.

$$Q_s = 3600 V_s A_s$$

En la cual:

Q_s = Caudal de gases en la chimenea a condiciones de chimenea, m³/h.

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

A_s = Área transversal de la chimenea, m².

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

Ecuación 7. Área transversal chimeneas circulares.

$$As = \pi \left(\frac{Ds}{2} \right)^2$$

En la cual:

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

Ds = Diámetro de la chimenea, m .

Para chimeneas rectangulares:

Ecuación 8. Área transversal chimeneas rectangulares.

$$As = LW$$

En la cual:

As = 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:

Ecuación 9. Caudal de gas en la chimenea en base seca corregido.

$$Qs_{ref} = 366(1 - Bws)Vs As \frac{T_{ref}}{Ts} \frac{Ps}{Pref}$$

En la cual:

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

Bws = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

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

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

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

Ps = Presión absoluta en la chimenea, $mm\ Hg$.

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

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

1.6.3 MÉTODO 3: DETERMINACIÓN DE LA MASA MOLAR DEL GAS

1.6.3.1 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

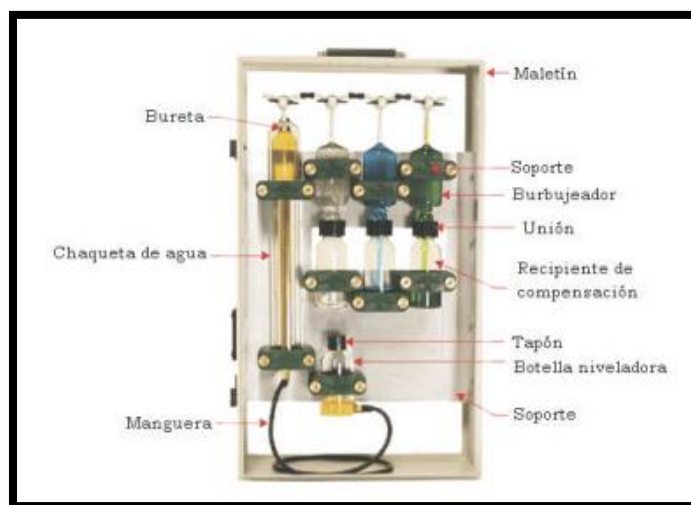
determinación de la masa molar seca y el aire en exceso se debe usar para el análisis un analizador Orsat o un analizador específico (IDEAM, 2011).

1.6.3.2 APLICABILIDAD

Este método es aplicable para determinar las concentraciones de CO, CO₂ y O₂, 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 CO₂, O₂, CO, y nitrógeno (N₂) no están presentes en concentraciones suficientes para afectar los resultados.

La Ilustración 10 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 (Londoño, 2006).

Ilustración 10. Aparato Orsat para analizar gases de combustión.



Fuente. (Londoño, 2006).

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 (CO₂); 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.

Ecuación 10. Porcentaje de CO₂ absorbido.

$$\%CO_2 = 100 \frac{(V_1 - V_2)}{V_1}$$

De modo similar, se va haciendo pasar el resto por el burbujeador que contiene una solución alcalina de pirogalol que absorbe oxígeno (O₂).

Ecuación 11. Porcentaje de O₂ absorbido.

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

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

Ecuación 12. Porcentaje de CO absorbido.

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

Ecuación 13. Porcentaje de N₂ absorbido.

$$\%N_2 = 100 \frac{V_4}{V_1}$$

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.

Ecuación 14. Masa molar del gas seco.

$$Md = 0.44(\%CO_2) + 0.32(\%O_2) + 0.28(\%CO + \%N_2)$$

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

1.6.4.1 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.

Fuente. (Londoño, 2006).

En la cual:

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

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

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

ρ_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 $m^3/mol K$.

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.

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

Ecuación 16. Volumen de gas seco.

$$V_{mref} = V_m Y \frac{P_m T_{ref}}{P_{ref}} T_m$$

En la cual:

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

V_m = Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, m^3 .

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:

Ecuación 17. Presión absoluta en el medidor de gas seco.

$$P_m = P_a + \frac{\Delta H}{13.6}$$

En la cual:

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

P_a = Presión barométrica, mm Hg.

ΔH = Presión diferencial promedio a través del orificio, mm H_2O .

Para determinar la masa molar del gas en la chimenea es necesario primero determinar la masa molar del gas seco en la chimenea:

Ecuación 18. Masa molar del gas seco.

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

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.

1.6.5 MÉTODO 5: DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO DE FUENTES ESTACIONARIAS

1.6.5.1 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.

1.6.5.2 APLICABILIDAD

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

1.6.5.3 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

Ilustración 11). 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 ($0.0212 \text{ m}^3/\text{min}$).



Fuente.(Londoño, 2006).

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:

Ecuación 19. Diámetro de la boquilla.

$$Dn = \sqrt{\frac{607.1 Qm Pm}{Tm Cp (1 - Bws)}} \sqrt{\frac{Ts Ms}{Ps \Delta P}}$$

En la cual:

Dn = Diámetro de la boquilla, mm.

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

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

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

Cp = Coeficiente del tubo pitot.

Bws = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

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

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

Ps = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

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

1.6.5.4 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

Ecuación 20. Concentración de partículas en base seca.

$$C_{pref} = \frac{W_p}{V_{mref}}$$

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.

1.6.5.5 EMISIÓN DE PARTÍCULAS

Ecuación 21. Emisión de partículas.

$$E_p = 0.001 C_{pref} Q_{sref}$$

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.

2. BIBLIOGRAFIA

Alcaldia Mayor de Bogotá. (2003). PROTOCOLO PARA EL MONITOREO DE EMISIONES ATMOSFERICAS, 1–22.

Daphia LTDA. (2011). GUÍA AUDITORIAS EN CAMPO Y ESTUDIOS DE EVALUACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN FUENTES FIJAS, 1–24.

IDEAM. (2011). MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN FUENTES FIJAS, (1).

Londoño, C. A. E. (2006). DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN FUENTES FIJAS.

Morales, W. D. (2010). Muestreo de Material Particulado Total – USEPA 5.