

METODO 5 US-EPA

Determinación De Las Emisiones De Material Particulado En Fuentes Estacionarias

Tomado del método No. 5 de la United States Environmental Protection Agency (EPA).

RESUMEN

El material particulado es extraído de la chimenea por medio de una línea de muestreo de manera isocinética (igual velocidad) succionando el gas por acción de una bomba de vacío la cual hace pasar la muestra de gas por un medio filtrante (filtro de fibra de vidrio) el cual se encuentra precalentado, al igual que la línea de muestreo a una temperatura de 120 ± 14 °C. Finalmente se determina la concentración de material particulado por medio de un análisis gravimétrico.

1. CARACTERISTICAS

• Método de medición propiamente dicho para determinar la rata de emisión y la concentración de partículas de una fuente fija de emisión.

• Además de la emisión de partículas el método determina las características fisicoquímicas de la emisión, tales como temperatura, humedad, composición, velocidad y caudal de los gases.

• La aplicación del método 5 requiere que previamente se realicen los métodos 1, 2, 3, y 4, conocidos como mediciones preliminares o simplemente muestreo preliminar.

• Con los datos del preliminar se determina el diámetro de la boquilla (D_n) y la constante de isocinétismo (K).

2. Procedimiento

- 2.1. Seleccionar el sitio de muestreo y el número mínimo de puntos transversales de acuerdo al método 1.
- Determinar las variables de los métodos 2 al 4.
- Seleccionar el tamaño de la boquilla basado en el rango de las cabezas de velocidad.
- Seleccionar una adecuada longitud de la sonda de tal forma que se puedan muestrear todos los puntos transversales.
- Seleccionar el tiempo de muestreo total de tal manera que el tiempo en todos los puntos transversales sea el mismo y que este no sea menor a 2 minutos.

2.2. Determinación del Diámetro de la Boquilla (D_n)

Comercialmente se encuentran boquillas entre 1/8 de pulgada (3,2 mm) y 1/2 pulgada (12,7 mm) de diámetro interno, con incrementos cada 1/16 de pulgada (1,6 mm).

Las boquillas deben ser calibradas con un pie de rey, realizando entre 3 y 4 mediciones de su diámetro interno en diferentes direcciones. La diferencia entre el mayor y menor valor no debe exceder 0,1mm.

$$D_n = \sqrt{\frac{K_5 * Q_m * P_m}{T_m * C_p * (1 - B_{ws})}} \sqrt{\frac{T_s * M_s}{P_s * \Delta P_{avg}}}$$

Ecuación 5.1

- D_n : Diámetro interno de la boquilla calculada (mm).
- K_5 : Constante equivalente a; 0,6071.
- Q_m : Flujo estimado por el orificio (generalmente 21.2 L/min).
- P_m : Presión absoluta en el medidor de gas seco (mmHg).
- T_m : Temperatura absoluta en el medidor de gas seco (°K).
- C_p : Coeficiente del tubo Pitot (0,85)
- B_{ws} : Humedad determinada en el método 4 (en fracción).

- T_s : Temperatura absoluta de los gases en chimenea (°K).
- M_s : Peso molecular en base humedad (g/g-mol).
- P_s : Presión absoluta (mmHg).
- ΔP_{avg} : Promedio geométrico de las cabezas de velocidad (mmH₂O).
- Determinación de la presión absoluta en el medidor de gas seco (Pm). Dado en mmHg.

$$P_m = P_{bar} + \left(\frac{\Delta H@}{13.6}\right) \quad \text{Ecuación 5.2}$$

- P_{bar} : Presión barométrica (mmHg).
- $\Delta H@$: Caída de presión de calibración (mmH₂O).

2.2. Determinación de la constante Isocinética

$$K = K_6 * D_n^4 * \Delta H@ * C_p^2 * (1 - B_{ws})^2 * \frac{M_d * T_m * P_s}{M_s * T_s * P_m} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

- K_6 : constante equivalente a; 0,00008038.
- D_n : Diámetro interno de la boquilla usada (mm).
- $\Delta H@$: Caída de presión de calibración (mmH₂O).
- C_p : Coeficiente del tubo pitot (0,85).
- B_{ws} : Humedad determinada en el método 4 (en fracción).
- M_d : Peso molecular en base seca (g/g-mol).
- T_m : Temperatura absoluta en el medidor de gas seco (°K).
- P_s : Presión absoluta (mm Hg).
- M_s : Peso molecular en base húmeda (g/g-mol).
- T_s : Temperatura absoluta de los gases en la chimenea (°K).
- P_m : Presión absoluta en el medidor de gas seco (mm Hg).

ISOCINETISMO

El cálculo del diámetro de la boquilla es de gran importancia en la búsqueda de un adecuado isocinétismo ($100 \pm 10\%$), ya que de acuerdo a la boquilla usada podemos encontrar las siguientes condiciones:

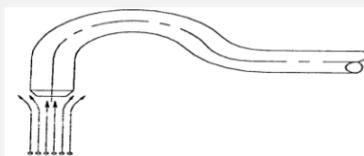
• Muestreo Sub-isocinetico

Se realiza una captura de la muestra de gas a una velocidad por debajo del isocinétismo.

Se extrae menos muestra de la requerida.

Es subestimada la concentración del material particulado.

Se debe a que la boquilla usada es de un diámetro menor a la calculada.



• Muestreo Sobre-Isocinetico

Se realiza una captura de la muestra de gas a una velocidad mayor a la de salida de los gases.

Se extrae más muestra de la requerida.

Es sobrestimada la concentración del material particulado.

Se debe a que la boquilla usada es de un diámetro mayor a la calculada.



• Muestreo Isocinetico

• Se realiza una captura de la muestra de gas a una velocidad igual a la de salida de los gases.

• Se extrae una muestra representativa del gas efluente. • Se determina una concentración del material particulado propia del gas emitido.

• Se debe a que la boquilla usada posee un diámetro con una diferencia menor de 1/32 de pulgada con respecto a la calculada.



2.3. Operación del Tren de Muestreo

Antes de iniciar el muestreo:

- Se deben limpiar los puertos de muestreo (niples) con el fin de no recolectar material depositado.
- Verificar que los sistemas de calentamiento del filtro y de la sonda se encuentren a la temperatura indicada $120^\circ \pm 15^\circ\text{C}$, la cual debe mantenerse durante todo el muestreo.
- Remover el tapón puesto en la boquilla, verificar que el tubo pitot y la sonda se encuentren adecuadamente posicionados.
- Se debe posicionar la boquilla en el primer punto transversal con la punta apuntando directamente en la corriente de gas.
- Se debe nivelar y poner en cero el manómetro.
- Luego de tener la boquilla en el primer punto se enciende la bomba ajustando el flujo a condiciones de isocinétismo ($\Delta H = K * \Delta p$).
- Cuando la sonda esté en posición, se deben tapar los espacios alrededor de la sonda en el puerto de muestreo para prevenir dilución de la corriente del gas.

2.4. Operación Durante el Muestreo

- Se debe realizar la medición en el área transversal de la chimenea en cada uno de los puntos determinados en el método 1, sin golpear la boquilla con las paredes de la chimenea.
- Mantener las temperaturas de la caja caliente en la sonda por medio de los controladores de temperatura.
- Mantener la temperatura de salida de los gases por debajo de los 20°C agregando hielo a la caja fría.
- Mantener el ΔH correspondiente a cada Δp en cada punto transversal.
- Si la presión de vacío es demasiado alta (mayor que la presión de calibración) se debe reemplazar el filtro y realizar de nuevo la prueba de fugas. Al finalizar el muestreo cerrar las válvulas y apagar la bomba, registrando el volumen final y realizando por última vez la prueba de fugas.

2.5. Registro Información

- Se deben registrar las lecturas del medidor de gas seco al inicio y final de cada incremento en el tiempo de muestreo.
- Se debe leer y registrar el Δp en cada punto transversal.
- Se debe calcular para cada Δp su respectivo ΔH ($\Delta H = K * \Delta p$).
- Se debe ajustar el ΔH de tal manera que puede ser leído en el manómetro inclinado, se deben registrar ambos valores (calculado y ajustado).
- Se deben leer y registrar las diferentes temperaturas del equipo (T° gases, T° Medidor, T° caja caliente, T° sonda y T° del ultimo burbujeador).





3. Cálculo del % de Isocinetismo

V_{m(std)}: Volumen de muestra de gas medido por el medidor de gas seco, corregido a condiciones estándar (dscm).

$$V_m(std) = K_1 * V_m * Y * \frac{P_{bar} + \left[\frac{\Delta H}{13.6}\right]}{T_m}$$

Ecuación 5.4

- **K₁**: Constante equivalente a: 0,3858 °K/mm Hg.
- **V_m**: Volumen medido en el punto transversal (m³).
- **Y**: Factor de calibración del medidor de gas seco.
- **P_{bar}**: Presión barométrica (mm Hg).
- **ΔH**: Caída de presión actual del punto transversal (mm H₂O).
- **T_m**: Temperatura absoluta del medidor en el punto transversal (°K).

V_s: Velocidad del gas de chimenea (m³ /s)

$$V_s = K_p * C_p * \sqrt{\frac{T_s * \Delta p}{P_s * M_s}}$$

Ecuación 5.5

- **K_p**: Constante equivalente a; 34.97
- **C_p**: Coeficiente del tubo pitot (Tipo "S" 0.85±0.02, Tipo estándar 1 ± 0.01).
- **T_s**: Temperatura absoluta del gas en el punto transversal (°K).
- **Δp**: Cabeza de velocidad en el punto transversal (mm H₂O).
- **P_s**: Presión absoluta del gas de chimenea (mm Hg)
- **M_s**: Peso molecular del gas en chimenea en base húmeda (g/g-mol).

Calculo a partir de los valores brutos (isocinétismo global)

$$I = \frac{100 * T_s * \left[K_4 * V_{lc} + \left[\frac{V_m * Y}{T_m} \right] * \left[P_{bar} + \left[\frac{\Delta H}{13.6} \right] \right] \right]}{60 * \theta * V_s * P_s * A_n}$$

Ecuación 5.6

- **T_s**: Temperatura absoluta promedio del gas de chimenea (°K)
- **K₄**: 0,003454 ((mm Hg*m³)/(ml*°K))
- **V_{lc}**: Volumen total de agua recolectada en los burbujeadores y silica gel (ml)
- **V_m**: Volumen de muestra de gas medido por el medidor de gas seco (dcm)
- **Y**: Factor de calibración del medidor de gas seco
- **T_m**: Temperatura absoluta promedio del medidor de gas seco (°K)
- **P_{bar}**: Presión barométrica (mm Hg)
- **ΔH**: Promedio de presión diferencial en el medidor de orificio (mm H₂O)
- **θ**: Tiempo total de muestreo (min)
- **V_s**: Velocidad del gas de chimenea (m/s)
- **P_s**: Presión absoluta del gas de chimenea (mm Hg)
- **A_n**: Área transversal de la boquilla (m²)

4. Recuperación de la Muestra

Tan pronto terminé el muestreo, inicia un procedimiento de limpieza esperando que la sonda se enfríe.

•Se debe limpiar la parte externa de la sonda y tapar ambos extremos de la sonda una vez retirada del tren de muestreo.

•Remover el cordón umbilical del cuello de ganso y desconectar la unión entre el primer impactador y el portafiltro.

•Retirar el portafiltro de la caja caliente y tapar los extremos del mismo.

•Trasladar la sonda, portafiltro y caja caliente hasta el área de limpieza.

Se deben recolectar las siguientes muestras:

- Contenedor 1: Filtro en caja de Petri.
- Contenedor 2: Lavados, se debe lavar con acetona o agua destilada la boquilla, línea de muestreo, conectores y parte frontal del portafiltro con la ayuda de un cepillo de nylon (entre 100 y 200 ml).

• Contenedor 3: Gel silica usada.

• Contenedor 4: Blanco de la acetona o agua destilada (200 ml). Todos los contenedores se deben rotular de tal manera que no se pierda la identificación de la muestra.

Todos los contenedores se deben rotular de tal manera que no se pierda la identificación de la muestra.

5. Control de Calidad del Muestreo

5.1. Verificación del Orificio

$$\Delta H@ = 0.00116923 * \Delta H * \frac{T_m * \theta^2}{P_{bar} * Y^2 * V_m^2}$$

Ecuación 5.7

• **ΔH@**: Caída de presión de calibración (mm H₂O)

$$40.386 < \Delta H@ < 53.086$$

- **0.00116923**: Constante (mmHg/K*(m³)²).
- **T_m**: Temperatura absoluta del medidor (K).
- **θ**: Tiempo total de muestreo (min).
- **P_{bar}**: Presión barométrica (mmHg).
- **Y**: Factor de Calibración.
- **V_m**: Volumen medido(m³).

5.2. Verificación del Sistema de Medición

$$Y_c = \frac{10}{V_m} * \sqrt{\frac{0.0319 * T_m}{P_{bar}}}$$

Ecuación 5.8

- **Y_c**: Valor de Calibración del medidor de gas seco.
- **V_m**: Volumen medido (m³).
- **T_m**: Temperatura absoluta del medidor (K).
- **P_{bar}**: Presión Barométrica (mmHg)

El valor de Y_c se compara con el factor Y realizando el siguiente calculo:

$$0.97Y < Y_c < 1.03Y$$

6. Procedimiento Analítico

Manejar cada contenedor de la siguiente manera:

- Contenedor 1 (filtro): Retire el filtro y llévelo a un desecador por 24 horas, péselo y repita la operación luego de mínimo 6 horas, si la variación no es mayor de 0,5 mg registre el valor mayor de lo contrario espere a que el peso sea constante.
- Contenedor 2 (lavados): Mida o pese el contenido de los lavados, posteriormente transfíralos a un beaker y evapore hasta sequedad, luego deseque por 24 horas y realice el pesaje.
- Contenedor 3 (Gel silica usada): Pese su contenido en una balanza de precisión.
- Contenedor 4 (blanco): Realice el mismo procedimiento que con el contenedor 2.

6.1. Volumen del gas seco cond. Std (V_m)

$$V_m(std) = K_1 * V_m * Y * \frac{P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6}}{T_m}$$

Ecuación 5.9

- **K₁**: 0.3858 °K/mmHg.
- **V_m**: Volumen medido (m³).
- **Y**: Factor de Calibración del medidor del gas seco.
- **P_{bar}**: Presion barométrica (mmHg).
- **T_m**: Temperatura absoluta del medidor (°K).

6.2. Contenido de Humedad (B_{ws})

$$B_{ws} = \frac{V_w(std)}{V_m(std) * V_w(std)}$$

Ecuación 5.10

- **V_{w (std)}**: Volumen de vapor de agua en la muestra de gas a condiciones estándar (scm).
- **V_{m (std)}**: Volumen del gas seco a condiciones estándar (scm).

$$V_w(std) = K_2 * V_{lc}$$

Ecuación 5.11

- **K₂**: 0.001333 m³/mL
- **V_{lc}**: Volumen total de líquido recolectado en los impactadores y la silica gel, (mL).

6.3. Concentración del blanco de la acetona o agua destilada (C_a)

$$C_a = \frac{m_a}{V_a * \rho_a}$$

Ecuación 5.12

- **m_a**: Masa de residuo de la acetona o agua destilada después de la evaporación (mg).
- **V_a**: Volumen de blanco de la acetona o agua (mL).
- **ρ_a**: Densidad de la acetona o agua (mg/mL).

6.3. Concentración de partículas en condiciones estándar (mg/scm)

$$C_s = \frac{m_n}{V_m(std)}$$

Ecuación 5.13

- **m_n**: Cantidad total de material particulado recolectado en el filtro y los lavados, menos el blanco de la acetona o agua (mg).
- **V_m**: Volumen del gas seco a condiciones estándar (scm).

6.4. Flujo volumétrico estándar seco del gas (dscm³/h)

$$Q_{ds} = 3600 * (1 - B_{ws}) * V_s * A_s * \frac{T_{std} * P_s}{T_s * P_{std}}$$

Ecuación 5.14

- **B_{ws}**: Huedad del gas (fracción).
- **V_s**: Velocidad del gas (m/s).
- **A_s**: Área transversal de la chimenea (m²).
- **T_{std}**: Temperatura absoluta estándar (293 °K).
- **T_s**: Temperatura promedio de los gases (°K).
- **P_s**: Presión absoluta en la chimenea (mmHg).
- **P_{std}**: Presión absoluta estándar (760 mmHg).

6.4. Rata de emisión o flujo másico (kg/h)

$$RE = \frac{C_s * Q_{ds}}{1000000}$$

Ecuación 5.15

- **C_s**: Concentración de partículas en condiciones estándar (mg/scm).
- **Q_{ds}**: Flujo volumétrico estándar seco del gas (dscm³/h).
- **1000000**: Factor de conversión mg a Kg.

Bibliografía

US EPA. (08 de 2017). *Air Emission Measurement Center*. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/method_5_0.pdf

DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN FUENTES ESTACIONARIAS

Reactivos y Materiales

- **Silica gel:** Tipo indicador, preferiblemente recuperable.
- **Agua:** Se requiere agua destilada o desionizada, es usada para la recuperación de la muestra de material particulado y para los burbujeadores.
- **Hielo triturado:** Se requiere para refrigerar la caja fría y permitir la condensación de los gases.
- **Grasa para cierre:** Grasa siliconada insoluble en acetona, resistente y estable al calor, se usa en conectores esmerilados.
- **Acetona:** Grado reactivo, el blanco de acetona debe ser inferior a 0,001% del peso de la acetona.
- **Cepillos para la sonda y boquillas:** Cepillos con cerda en nylon con cable central en acero inoxidable, nylon o teflón.
- **Frascos lavadores:** Generalmente para el líquido de lavado (acetona o agua destilada)
- **Contenedores en vidrio:** Frascos en vidrio para el transporte de los lavados con acetona o agua.
- **Caja de Petri:** En vidrio para el transporte de los filtros.
- **Boquilla:** En acero inoxidable o vidrio con extremo cónico afilado. Comercialmente se encuentran boquillas entre 1/8 de pulgada (3,2 mm) y 1/2 pulgada (12,7 mm) de diámetro interno, con incrementos cada 1/16 de pulgada (1,6 mm).

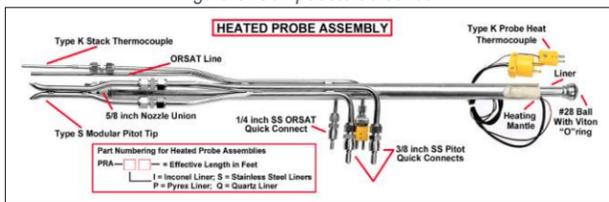
Figura 2. Boquilla acero inoxidable



Fuente: Environmental supply.

- **Línea de muestreo:** Tubo en acero inoxidable o vidrio con sistema de calentamiento que mantenga una temperatura entre 120 ± 14 °C.

Figura 3. Compuesto de sonda.



Fuente: Environmental Supply

- **Tubo de pitot tipo "S":** Tubo en acero inoxidable unido a la sonda.

Figura 4. Tubo pitot tipo "S".



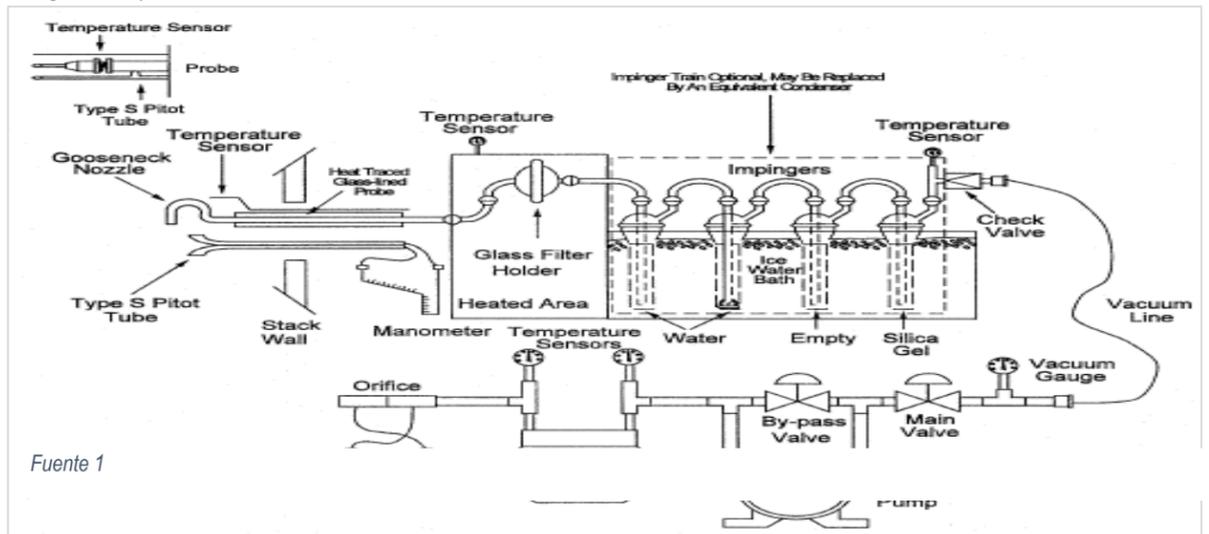
- **Caja caliente:** Sistema de calentamiento capaz de mantener una temperatura entre 120 ± 14 °C alrededor del porta-filtro.

Figura 5. Caja Caliente



TREN DE MUESTREO

Figura 1. Esquema del Tren de muestreo. Método 5 US EPA.



Fuente 1

Fuente: US EPA Method 5 - Particulate Matter (PM).

- **Portafiltro:** Elemento en vidrio de borosilicato con un soporte en teflón y una empaquetadura de caucho siliconado.

Figura 6. Portafiltro.



Fuente: Environmental Supply.

- **Filtro:** Filtro en fibra de vidrio con un porcentaje de penetración <0,05% en partículas de 0,3 µm.

Figura 7. Filtro fibra de vidrio.



- **Caja Fría:** Usado para determinar el contenido de humedad, compuesto por 4 burbujeadores con la misma configuración planteada en el método 4.

Figura 8. Caja fría.



- **Adaptador Umbilical o cuello de ganso:** Comunica la línea de vacío con la caja fría inicialmente, incluye un termopar para monitorear la temperatura en este punto del tren de muestreo.

Figura 9. Cuello de ganso.



- **Cordón Umbilical:** Comunica la línea de vacío del tren de muestreo con la consola de control, incluye adaptadores de termopares para la comunicación de temperaturas a lo largo del tren de muestreo.

Figura 10. Cordón Umbilical.



- **Consola de Muestreo:** En la mayoría de los casos se encuentra a nivel del terreno y se conecta con el tren de muestreo mediante un cordón umbilical, está compuesto por los siguientes elementos:

Figura 11. Consola de control.



- **Medidor de gas seco (DGM):** Es en este instrumento en donde se realizan las lecturas del volumen medido.

Figura 12. Medidor de gas seco.



- **Manómetro inclinado:** Manómetro de doble columna de agua usado para las lecturas de Δp y ΔH .
- **Medidor de vacío:** manómetro de aguja, también llamado vacum, usado para determinar el vacío generado por la bomba de succión.
- **Controles de temperatura:** Pueden ser analógicos o digitales en donde se controla la temperatura de la sonda y caja caliente.
- **Display de temperaturas:** En él se pueden observar las diferentes temperaturas de cada termopar.
- **Selector de temperatura:** Dispositivo con el cual se puede seleccionar la temperatura de cualquier termopar del equipo.
- **Válvula gruesa:** Se usa para dar el paso total del vacío generado por la bomba.
- **Válvula fina:** Es usada para ajustar el ΔH requerido

- **Bomba de succión:** Puede ser de doble diafragma o de aceite, es usada para generar el vacío necesario para extraer la muestra de la chimenea.

Figura 13 Bomba de vacío.

