



Fuente: <https://bit.ly/3zucSF0>

Considera fuentes de contaminación, resultados de calidad (como la contaminación atmosférica), emisiones de dióxido de carbono (CO_2), producción limpia, desarrollo sostenible y transferencia de calor, así como las formas para reducir la polución.

Control de la contaminación del Aire

Para este ejercicio resulta muy útil revisar y analizar estudios de casos presentes en la literatura relacionados con problemáticas asociadas a las fuentes de contaminación del aire, patrones de emisiones en escenarios ambientales de la agroindustria y la industria química.

Medición y análisis de huella de carbono

La huella de carbono representa el volumen total de gases de efecto invernadero (GEI) que producen las actividades económicas y cotidianas del ser humano. Conocer el dato —expresado en toneladas de CO_2 emitidas— es importante para tomar medidas y poner en marcha las iniciativas necesarias para reducirla al máximo, empezando por cada uno de nosotros en nuestro día a día.



Fuente <https://bit.ly/3FZfGMR>

Al emplear un vehículo, un teléfono celular o una lavadora, se genera una amplia gama de gases que se acumulan en la atmósfera y sobrecalientan la tierra. Estas emisiones aceleran el cambio climático, como advierte la Organización de las Naciones Unidas (ONU), y si no se neutralizan a tiempo con la descarbonización de la economía y otras medidas, como los impuestos ambientales, se contribuye con un mundo más inhóspito.

El indicador ambiental de huella de carbono mide tanto las emisiones directas como indirectas de compuestos como el metano (CH_4), el óxido de nitrógeno (N_2O), los hidrofluorocarburos (HFCs), los perfluorocarburos (PFCs), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y, sobre todo, del más abundante y que más ha contribuido al calentamiento global desde 1990: el dióxido de carbono (CO_2).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) sostiene que la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanzó un nuevo récord en 2019 y que los niveles actuales de CO_2 atmosférico son comparables a los de hace más de tres millones de años, cuando el termómetro terrestre marcaba unos 3°C más y el nivel del mar medía entre 10 y 20 metros más que hoy. Hasta ahora, la huella de carbono no ha parado de crecer —se ha multiplicado por 11 desde 1961— y ya supone el 60 % del impacto total del hombre en el medio ambiente.

Insumos e instrumentos para medir la huella de carbono

Materias primas e insumos

- Sonda de muestreo isocinético
- Dron volador a control remoto
- Analizador de gases automático
- Filtro de material particulado
- Agua destilada
- Hielo
- Silica Gel

Suposiciones y consideraciones

- El combustible utilizado en las calderas es el bagazo de la caña de azúcar.
- La chimenea es de sección circular.
- No hay obstrucciones en el tubo pitot.
- El instrumento de recolección de muestra (sonda de muestreo) no presenta fugas. Se obviará la necesidad de realizar prueba de fugas al instrumento.
- Los equipos de lectura ya cuentan con una calibración previa.

Metodología

El muestreo de las emisiones contaminantes del aire se realiza con una serie de métodos que consisten en tomar una muestra de la emisión que permita determinar la concentración de los contaminantes que contiene, velocidad del gas al interior de la fuente fija, caudal y el cálculo del flujo másico del contaminante. Este muestreo se realiza con un muestreador de chimenea isocinético como el que se muestra a continuación:

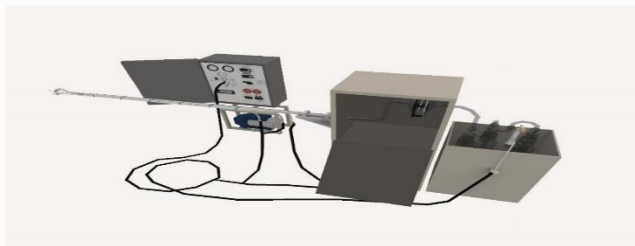


Fig. 1. Sonda de muestreo isocinético.

La muestra debe tomarse evitando generar una separación mecánica de los contaminantes con respecto al gas portador, es decir a la misma velocidad en que son transmitidos los contaminantes en el ducto de muestreo; a esto se denomina muestreo isocinético.

Cada método describe el procedimiento detallado para la determinación de una variable específica necesaria para el análisis de las emisiones contaminantes de la fuente fija. Los 4 primeros métodos, conforman lo que se llama el "muestreo preliminar". El cual es necesario y vital en el alistamiento de la sonda de muestreo para el desarrollo de los otros métodos. Con las variables obtenidas de estos 4 primeros métodos, se realiza el cálculo del diámetro de la boquilla de muestreo para la recolección de muestra y la implementación de los otros métodos de determinación.

A. Método N°1. Localización del sitio de muestreo y los puntos de muestreo transversales

Para obtener una medición representativa de las emisiones de contaminantes y/o los caudales de una fuente fija o estacionaria, se debe seleccionar un sitio de medición en la chimenea en donde la corriente (el gas) fluye en una dirección conocida garantizando que se presente un régimen de flujo laminar. Otro aspecto importante que garantiza el desarrollo de un perfil de muestreo adecuado es dividiendo 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.

Este método es aplicable para corrientes de gas que fluyen en ductos y chimeneas. No puede ser usado cuando: el flujo es turbulento, cuando el diámetro de la chimenea es inferior a 0.30 m o tiene un área transversal inferior a 0.071 m² o cuando 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.

Para la localización del sitio de muestreo, 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 (base de la chimenea) o dos (2) diámetros corriente arriba antes de la perturbación (boca de chimenea), ya que con cualquiera de estos dos criterios, se puede garantizar la presencia de un flujo laminar. Se puede seleccionar si se coloca el sitio de muestreo con el criterio de los 8 diámetros, el de los 2 diámetros o un punto entre estos dos. La selección del sitio de muestreo basándose en dicha recomendación, depende en parte de la facilidad que se tiene a la hora de colocar la plataforma para el muestreo.

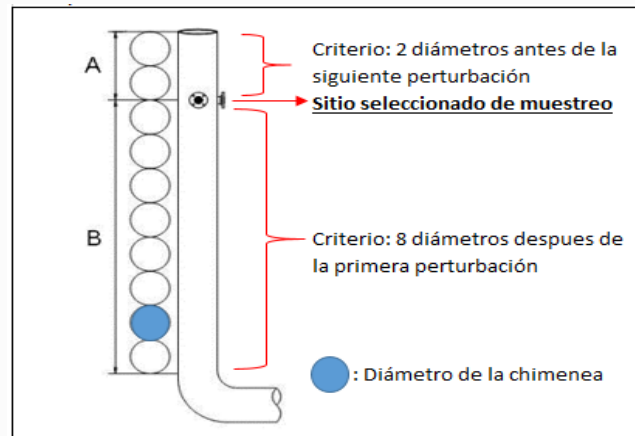


Fig. 3. Localización del sitio de muestreo de acuerdo a la norma.

En la industria se pueden encontrar chimeneas circulares y rectangulares. Para ductos rectangulares se usa el término diámetro equivalente (D_e), el cual se define así:

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

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

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

- Que la plataforma sea amplia y resistente
- Que sea de fácil acceso
- Que cuente con suministro de energía eléctrica

MONITOREO DE AIRE

- Que cuente con protección necesaria para evitar los cortos circuitos y choques eléctricos

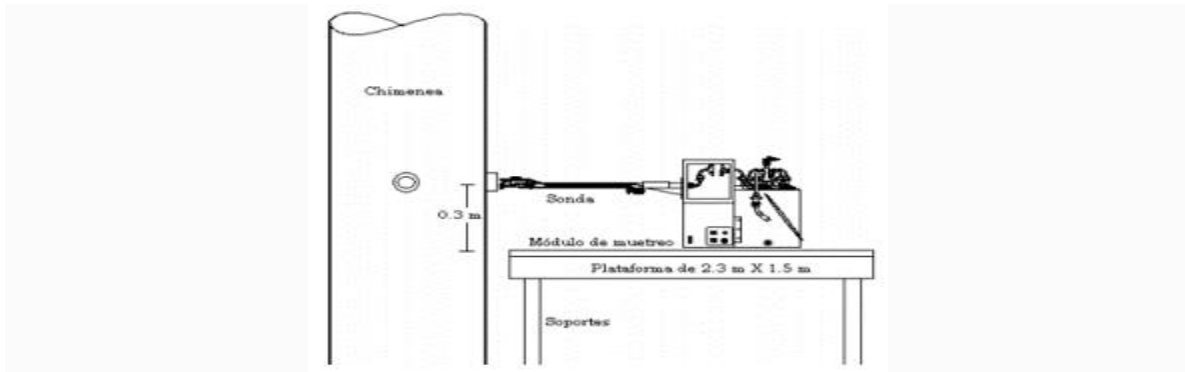


Fig. 4. Sonda de muestreo en chimenea.

Para la determinación de los puntos transversales de muestreo, existe una regla de dedo la cual hace para la determinación del número de puntos transversales a escoger. La regla de dedo es la siguiente: Cuando los criterios de ocho y dos diámetros se cumplen, el mínimo número de puntos transversales deberá ser:

- Doce (12), para chimeneas circulares o rectangulares con diámetros (o diámetros equivalentes) mayores a 0,61m.
- Ocho (8), para chimeneas circulares con diámetros entre 0,3 y 0,61m.
- Nueve (9), para chimeneas rectangulares con diámetros equivalentes entre 0,3 y 0,61m.

Cuando no se cumple con los criterios de ocho y dos diámetros, el número mínimo de puntos transversales se determina mediante el uso de la siguiente figura:

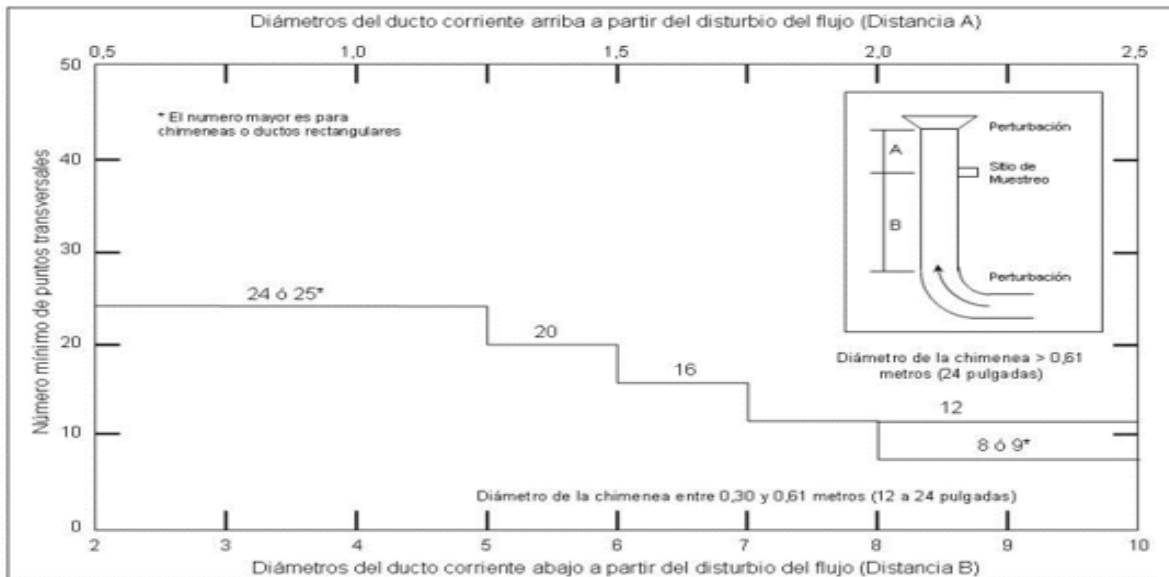


Fig. 5. Tabla para selección de puntos transversales de muestreo.

B. Método N°2. Determinación de la velocidad del gas en la chimenea (Tubo Pitot tipo S)

La velocidad de un gas promedio en chimenea se determina a partir de la densidad del gas y a partir de la medición de la cabeza de velocidad promedio con un tubo Pitot tipo “S”. Esta, se relaciona con la presión de velocidad a través de la ecuación de Bernulli:

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

En donde:

- 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 (0.84)
- ΔP : Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mmH₂O
- T_s : Temperatura promedio del gas en la chimenea, K
- P_s : Presión absoluta en la chimenea, mmHg
- M_s : Masa molar del gas en la chimenea, g/mol

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

En donde:

ΔP_i : Presiones de velocidad en cada punto de muestreo, mmH₂O

n: Número de puntos de muestreo

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

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

En la cual:

P_a : Presión barométrica, mmHg

P_e : Presión estática promedio en la chimenea, mmH₂O

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 conocer la temperatura promedio del gas en la chimenea, T_s hay que tomar un valor de temperatura en cada uno de los puntos de muestreo escogidos y calcular el promedio de los mismos así:

$$T_s = \frac{\sum T_i}{n}$$

Siendo:

T_i: Temperatura del gas en la chimenea en el punto de muestreo i, K

C. Método N°3. Análisis de gases para la determinación del peso molecular del gas en base seca

Una muestra es extraída de la chimenea, por medio de uno de los siguientes métodos: (1) Un solo punto, muestreo puntual, (2) Un solo punto, muestreo Integrado o (3) Multipunto, Muestreo Integrado. La muestra del gas es analizada para determinar el porcentaje de gases necesarios para el cálculo de la masa molecular del gas en base seca (CO₂, O₂, CO y N₂). Para esta determinación, se pueden utilizar los equipos ORSAT o un analizador automático de gases.

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 siguiente figura muestra un analizador de gases de combustión que consta de varias celdas electroquímicas que sirven para determinar a través de lectura directa la concentración de oxígeno (O₂) y monóxido de carbono (CO) en los gases de combustión, y calcular la concentración de dióxido de carbono (CO₂) al introducirle al equipo el combustible que se está utilizando.



Fig. 6. Analizador automático de gases.

Se muestra a continuación, 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.

MONITOREO DE AIRE

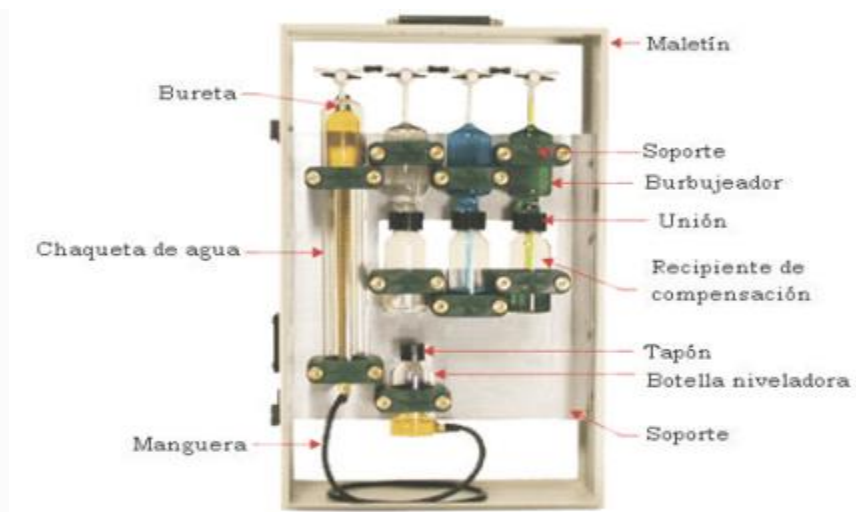


Fig. 7. Recolector de muestra.

Para el desarrollo del método, inicialmente se debe realizar la recolección de la muestra en la chimenea.

En el procedimiento de muestreo puntual, el punto de muestreo en el ducto debe estar o en el centroide del área transversal o en un punto a no menos de 1.0 m de las paredes. Se debe tomar una muestra y llevarla al analizador y analizarla inmediatamente para determinar el porcentaje de gases requerido.

Se debe muestrear a flujo constante ($\pm 10\%$). El muestreo debe ser simultáneo y durante el mismo tiempo que la determinación del flujo de la emisión del contaminante. Se recomienda una recolección de al menos 28 litros de gas de muestra; sin embargo, volúmenes inferiores se pueden recolectar, si desea. Dentro de las ocho horas posteriores a la toma de la muestra, se debe analizar para encontrar el porcentaje de gases usando un analizador ORSAT o un analizador de gas de combustión.

En el procedimiento de muestreo integrado de múltiples puntos, un mínimo de ocho puntos transversales debe ser usado para chimeneas circulares con diámetros menores a 61 cm, un mínimo de nueve puntos debe ser usado para chimeneas rectangulares con diámetros equivalentes menores a 61 cm, y un mínimo de 12 puntos transversales deben ser usados en otros casos. Los puntos transversales se deben localizar de acuerdo al Método 1. Para realizar el muestreo, se debe ubicar la sonda en todos los puntos transversales, y muestrear en cada punto por un tiempo igual de duración. Luego llevar esta muestra a un analizador ORSAT o un analizador de gases de combustión para determinar las concentraciones de los gases de la chimenea.

Con los porcentajes de CO_2 , O_2 , N_2 y CO determinados, se debe utilizar la siguiente fórmula para la determinación del peso molecular del gas en base seca así:

$$M_d = 0,440 (\% \text{CO}_2) + 0,320 (\% \text{O}_2) + 0,280 (\% \text{N}_2 + \% \text{CO})$$

En donde:

- M_D : Peso molecular del gas en base seca, g/mol
- $\% \text{CO}_2$: Porcentaje de volumen de CO_2 en base seca
- $\% \text{O}_2$: Porcentaje de volumen de O_2 en base seca
- $\% \text{CO}$: Porcentaje de volumen de CO en base seca

Instructor: Jairo R. Suárez G.

- %N₂: Porcentaje de volumen de N₂ en base seca
- 0.28: Peso molecular de N₂ ó CO, dividido en 100
- 0.32: Peso molecular de O₂, dividido en 100
- 0.44: Peso molecular de CO₂, dividido en 100

D. Método N°4. Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea

Una muestra de gas es extraída de la fuente a una velocidad constante, la humedad es removida de la muestra y determinada volumétrica o gravimétricamente. El método contiene dos posibles procedimientos: un método de referencia y uno de aproximación. El método de referencia es usado para determinar con exactitud el contenido de humedad. El método de aproximación, provee estimativos de porcentaje de humedad para ayudar a establecer las tasas de muestreos isocinéticas antes de una corrida de medición de emisiones contaminantes. Los medios alternativos para la aproximación del contenido de la humedad, (por ejemplo, tubos desecados, técnicas bulbo húmedo bulbo seco, técnicas de condensación, cálculos estequiométricos, experiencias previas) son igualmente aceptables. El método de referencia a menudo se realiza simultáneamente con un recorrido de medición de emisiones contaminantes. Cuando lo es, el cálculo del porcentaje isocinético, la tasa de emisión de contaminantes, se basará en los resultados del método de referencia o su equivalente. Estos cálculos no se basan en los resultados del método de aproximación, es capaz de obtener resultados dentro del uno (1%) de humedad del método de referencia.

En este caso se hará énfasis en el método de referencia siendo el que proporciona un valor exacto del contenido de humedad requerido. Para el desarrollo de este método, se utiliza el tren de muestreo isocinético empleando la caja caliente, la fría y la consola de control de la sonda. Antes de comenzar, se debe hacer la preparación de la sonda de la siguiente forma: Llenar 2 impingers con 50 ml de agua destilada cada uno, dejar un impinger vacío y llenar el sobrante con 100 g de silica gel. Colocar estos 4 impingers dentro de la caja fría con sus respectivas conexiones. Luego se debe llenar la caja fría con hielo con el fin de evitar evaporación del gas en este punto. Una vez hecho esto, se debe acoplar la caja fría y la caja caliente no sin antes colocar el filtro con sus soportes al interior de la caja caliente. La función de este filtro es retener el material particulado evitando que entre en la caja fría y cause interferencia de lecturas. Es importante que esta caja permanezca en estado caliente para evitar condensaciones del gas antes de pasar a la caja fría. Una vez las dos cajas se encuentren acopladas, se debe colocar a la caja caliente, la sonda de muestreo o probador. Finalmente conectar el cordón umbilical a la sonda, a la caja fría, a la consola de control y a la bomba de vacío. Es importante registrar los datos de volúmenes de los dos primeros impingers y el dato de peso (silica + impinger) ya que estos datos se emplearán para los cálculos posteriores de contenido de humedad.

Una vez ensamblado todo el tren de muestreo, se procede a tomar las muestras de gas de acuerdo a los puntos seleccionados del método 1. Este muestreo debe hacerse en un tiempo igual por cada muestra. Finalizado el muestreo de todos los puntos, se retira la sonda de la chimenea y se desensambla el tren de muestreo. Se retiran los impingers de la caja fría y se mide la cantidad de agua contenida en los 3 primeros impingers. Luego se pesa el cuarto impinger (el que contiene la silica gel) y se registran estos datos.

Finalmente se revisa la lectura de presión absoluta, temperatura absoluta y volumen de gas seco que registra la consola de control.

Con todos los datos del muestreo, se procede a hacer los siguientes cálculos:

$$V_{wc(std)} = K_1 (V_f - V_i)$$

MONITOREO DE AIRE

Siendo:

- $V_{wc(std)}$: Volumen de vapor de agua condensado corregido a condiciones estándar, m^3
- K_1 : Constante en m^3/ml
- V_f : Volumen final de agua condensada recolectada en los tres impingers, ml
- V_i : Volumen inicial de agua de los dos impingers, ml

$$V_{wsg(std)} = K_3 (W_f - W_i)$$

Siendo:

- $V_{wsg(std)}$: Volumen de vapor de agua colectado en la silica gel corregido a condiciones estándar, m^3
- K_3 : Constante en m^3/g
- W_f : Peso final de la silica gel + impinger, g
- W_i : Peso inicial de la silica gel + impinger, g

$$V_{m(std)} = K_4 Y \frac{V_m P_m}{T_m}$$

Siendo:

- $V_{m(std)}$: Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco corregido a condiciones estándar, m^3
- K_4 : Constante en $K/mmHg$
- Y : Factor de calibración del medidor de gas seco
- V_m : Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, m^3
- P_m : Presión absoluta en el medidor de gas seco, mmHg
- T_m : Temperatura absoluta en el medidor, K

Con estos tres volúmenes se puede calcular el contenido de humedad de la muestra de gas de la siguiente forma:

$$B_{ws} = \frac{V_{wc(std)} + V_{wsg(std)}}{V_{wc(std)} + V_{wsg(std)} + V_{m(std)}}$$

En donde:

- B_{ws} : Contenido de gas presente en el gas

Para finalizar, se realiza el cálculo del peso molecular del gas en base húmeda utilizando este valor de contenido de humedad y el valor del peso molecular en base seco obtenido del método 3:

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

En donde:

- M_s : Peso molecular del gas en base húmeda, g/mol

Este valor de peso molecular calculado, se requiere para poder determinar la velocidad del gas en la chimenea que se expresa en el método 2.

Con estos cuatro métodos, se termina la fase de muestreo preliminar que es necesario hacer siempre que se requiera realizar un análisis de gases de una fuente fija. Los siguientes métodos servirán para determinar las concentraciones de contaminantes individuales del gas junto con el contenido de material particulado.

Fuentes

<https://bit.ly/3FZfGMR>

<https://www.youtube.com/watch?v=CsmlikHLgf0>