



**INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS  
AMBIENTALES**  
**Subdirección de Estudios Ambientales**

**MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN  
FUENTES FIJAS**

**MÉTODO 5 - DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN  
FUENTES ESTACIONARIAS**

**VERSIÓN No. 1.0**

**Fecha: Febrero de 2011**

**CORRESPONDENCIA:** Este método es equivalente al Código Federal de Regulación (Code Federal of Regulations) CFR 40 parte 60 ANEXO A de los Estados Unidos de América.

Preparó: Mario F. Guerrero- IDEAM  
Revisó: Carlos Rodríguez - MAVDT  
Aprobó: Margarita Gutiérrez - IDEAM

## CONTENIDO

1. ALCANCE Y APLICACIÓN .....	3
2. RESUMEN DEL MÉTODO .....	3
3. DEFINICIONES (RESERVADO) .....	3
4. INTERFERENCIAS (RESERVADO) .....	3
5. SEGURIDAD. ....	3
6. EQUIPOS Y SUMINISTROS .....	3
7. REACTIVOS Y ESTANDARES. ....	7
8. RECOLECCIÓN PRESERVACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE LA MUESTRA .....	7
9. CONTROL DE CALIDAD .....	14
10. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN .....	15
11. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO .....	17
12. ANÁLISIS DE DATOS Y CÁLCULOS .....	18
13. MEJORAMIENTO DEL METODO (RESERVADO) .....	23
14. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN [RESERVADO] .....	23
15. MANEJO DE RESIDUOS [RESERVADO] .....	23
16. PROCEDIMIENTOS ALTERNATIVOS .....	23
17. REFERENCIAS .....	28
18. TABLAS, DIAGRAMAS, CARTAS DE FLUJO, Y VALIDACIÓN DE DATOS .....	29

Nota. Este método no incluye todas las especificaciones (p.e. equipos y suministros) y procedimientos (p.e. muestreo y análisis) esenciales para su funcionamiento. Algún material es incorporado por referencia de otros métodos en este documento. Por lo tanto para obtener resultados confiables el personal que utilice este método debe tener un alto conocimiento de las pruebas adicionales: Método 1, Método 2, Método 3.

## 1. ALCANCE Y APLICACIÓN

- 1.1. Analitos: Material Particulado (PM). Número asignado No CAS.
- 1.2. Aplicabilidad. Este método es aplicable para la determinación de las emisiones de material particulado en fuentes fijas.
- 1.3. Objetivos de la calidad de los datos. El cumplimiento de los requerimientos de este método aumentará la calidad de los datos obtenidos en los métodos de medición de contaminantes atmosféricos.

## 2. RESUMEN DEL MÉTODO

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  $120 \pm 14$  °C ( $248 \pm 25$  °F) u otra temperatura como se especifica por una subparte aplicable del estándar o aprobado por la autoridad ambiental para una aplicación particular. La masa de material particulado, que incluye cualquier material que se condensa o por encima de la temperatura de filtración, es determinada gravimétricamente después de la remoción del agua no combinada.

## 3. DEFINICIONES (RESERVADO)

## 4. INTERFERENCIAS (RESERVADO)

## 5. SEGURIDAD.

- 5.1. **Cláusula de exención de responsabilidad:** Este método puede implicar materiales peligrosos, operaciones y equipo. Este método de ensayo no aborda todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer apropiadas prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de realizar este método de ensayo.

## 6. EQUIPOS Y SUMINISTROS

- 6.1. Toma de la muestra. Los siguientes elementos son requeridos para realizar la recolección de la muestra.

6.1.1. Tren de muestreo. El tren de muestreo utilizado en este método se muestra en la Figura 5.1. en la sección 18. Una completa guía de construcción con detalles se encuentra en el APTD-0581 (Referencia 2 en la sección 17), los modelos comerciales de este tren también están disponibles. Para cambios del APTD-0581 y para modificaciones admisibles del tren mostrado en la figura 5-2 ver las siguientes secciones.

**Nota:** Los procedimientos de operación y mantenimiento para el tren de muestreo, están descritos en el APTD-0576 (Referencia 3 en la sección 17). Desde el correcto uso es importante en la obtención de

resultados validos, todos los usuarios deberían leer APTD-0576 y adoptar los procedimientos de operación y mantenimiento presentados en este, a menos que se especifique lo contrario en este documento.

6.1.1.1. Boquilla. En acero inoxidable (316) o vidrio con extremo cónico afilado. El ángulo del cono deberá ser menor o igual a 30° y en el borde exterior para preservar un diámetro interno constante. La boquilla debe ser de ajuste de gancho o diseño de codo, si es fabricada en acero debe ser continua sin costuras o uniones. Un rango adecuado para muestreo isocinéticos debe ser validado. El tamaño típico de boquillas se encuentran entre 0.32 a 1.27 cm (1/8 a 1/2 in) diámetro interno (ID) con incrementos de 0.16 cm (1/16 in). Tamaño de boquillas mayores también deben ser validados si altos volúmenes en el tren de muestreo son utilizados. Cada boquilla debe ser calibrada como se muestra en la sección 10.1.

6.1.1.2. Línea de la sonda. Tubo de vidrio Borosilicato o Cuarzo, con un sistema de calentamiento capaz de mantener la temperatura del gas en la sonda, durante el muestreo, a  $120 \pm 14$  °C ( $248 \pm 25$  °F). De la temperatura actual, a la salida de la sonda no es necesario ser monitoreada a lo largo del muestreo, para sondas construidas de acuerdo con el APTD-0581 y utilizando curvas de calibración del of APTD-0576 (o calibradas de acuerdo con el procedimiento APTD-0576) se deben considerar aceptables. Cualquiera de los dos materiales, vidrio Borosilicato o Cuarzo, pueden ser utilizados en chimeneas con temperaturas hasta 480 °C (900 °F); de fibra de cuarzo se han utilizado a temperaturas entre 480 y 900 °C (900 y 1650 °F). Ambos tipos de líneas pueden ser utilizadas para altas temperaturas y cortos periodos de tiempo, el ablandamiento del borosilicato por la temperatura es a 820 °C (1500 °F) y para fibra de cuarzo de 1500 °C (2700 °F). Siempre que sea práctico se debe procurar que se empleen líneas de borosilicato o cuarzo. Alternativamente, existen sondas de metal (ejemplo, Acero Inoxidable 316, Incoloy 825 u otro metal resistente a la corrosión) fabricadas con tubos continuos también puede ser empleada.

6.1.1.3. Tubo de Pitot. tipo S (STAUSSCHEIBE). Tal como se describió en la sección 6.1 del método 2, El tubo pitot debe estar unido a la sonda (como se muestra en la figura 5-1), para permitir un monitoreo constante de la velocidad de salida del gas de la chimenea. El impacto (alta presión), el plano abierto del tubo pitot debe ser igualado o por encima del plano de entrada de la boquilla (ver método 2, figura 2-7) durante el muestreo. El tubo pitot tipo S debe ser ensamblado conociendo su coeficiente, tal como se determino en la sección 10 del método 2.

6.1.1.4. Manómetro Diferencial de Presión. Dos manómetros inclinados (como se describe en la sección 6.2 del método 2) o dispositivo equivalente para las lecturas de: (1) cabeza de velocidad y (2) presión diferencial del orificio.

6.1.1.5. Porta-Filtro. Vidrio Borosilicato, con un soporte de frita de vidrio y una empaquetadura de caucho siliconado. Se pueden utilizar otros materiales de construcción (ejemplo: Acero inoxidable, Teflón, Viton) sujeto a la aprobación de la autoridad ambiental. El diseño del porta filtro debe estar provisto de un sello positivo contra las fugas de afuera o alrededor del filtro. El porta filtro debe estar ensamblado inmediatamente después de la sonda (o ciclón si se utiliza).

6.1.1.6. Caja Caliente. Cualquier sistema de calentamiento capaz de mantener una temperatura de  $120 \pm 14$  °C ( $248 \pm 25$  °F), alrededor del porta filtro durante el muestreo, o cualquier otra temperatura que se especifique por una aplicación de los estándar, para una aplicación en particular.

6.1.1.7. Sensor de temperatura. Un sensor de temperatura capaz de medir la temperatura con una precisión de  $\pm 3$  °C (5,4 °F), debe ser instalado de modo que la punta del sensor este en contacto directo con la muestra de gas y la temperatura alrededor del porta filtro debe ser monitoreada y controlada durante el muestreo.

6.1.1.8. Condensador. El siguiente sistema deberá ser usado para determinar el contenido de humedad del gas en la chimenea. Cuatro burbujeadores conectados en serie y libre de fugas, mediante sellos de terminales con vidrio esmerilado u otro sello no contaminante. El primero, tercer y cuarto burbujeador debe ser diseño Greenburg-Smith modificado reemplazando la punta con un tubo de diámetro interno (ID) de 1.3 cm (1/2 in) extendido 1.3 cm (1/2 in) sobre el fondo del frasco. El segundo burbujeador debe ser diseño Greenburg-Smith con la punta estándar. Modificaciones (p.e. utilizando conexiones flexibles entre los burbujeadores, utilizando otros materiales que el vidrio o utilizando líneas de vacío flexibles para conectar el portafiltra con el condensador) pueden ser utilizados de acuerdo con la aprobación de la autoridad ambiental. El primer y segundo burbujeador deben contener un contenido conocido de agua (sección 8.3.1) el tercero debe estar vacío y el cuarto debe contener un peso conocido de sílica gel o un desecante equivalente. Se deberá instalar un termómetro a la salida del cuarto burbujeador para medir la temperatura con una aproximación de 1 °C (2 °F), para monitorear el proceso de condensación. Alternativamente cualquier sistema que enfríe la corriente gaseosa de la muestra y que la medición permita la condensación de agua y dejando condensar la humedad con una precisión de 1ml o 1 g puede ser utilizado de acuerdo con la aprobación de la autoridad ambiental. Otra técnica aceptable que involucra la medición de la condensación del agua es la gravimétrica o la técnica volumétrica y la determinación de la humedad por condensación por: (1) monitoreando la temperatura y la presión a la salida del condensador y utilizando la Ley de Dalton para presiones parciales o (2) pasando la corriente gaseosa de la muestra a través de sílica gel (o un desecante equivalente) previamente pesada, como trampa de salida de gases manteniendo por debajo de 20 °C (68 °F) y determinando el peso ganado. Si otro medio distinto a la sílica es utilizado para determinar la cantidad de humedad presentada como condensación, es recomendado que la sílica gel (o su equivalente) sean utilizados entre el sistema de condensación y la bomba, para prevenir la condensación de humedad en esta, en los dispositivos de medición y para evitar hacer las correcciones de humedad en el volumen medido.

**Nota:** Si la determinación del material particulado recolectado en los burbujeadores se desea adicionar al contenido de humedad el sistema de impactador describe sobre cuál debe ser usado sin modificación.

6.1.1.9. Sistema de Medición. Conformado por medidor de vacío, bomba libre de fugas, termómetros capaces de medir temperaturas con una aproximación de 3 °C (5,4 °F), medidor de gas seco (DGM) capaz de medir volúmenes con una aproximación del 2% y equipos relacionados como se muestra en la Figura 5.1. Se pueden utilizar otros sistemas de medición capaces de mantener una tasa de muestreo dentro del 10% de isocinétismo y determinar los volúmenes de muestreo dentro del 2%. Cuando el sistema de medición se utiliza en conjunción con un tubo Pitot, el sistema deberá permitir controles periódicos de las tasas isocinéticas.

6.1.1.10. Trenes de muestreo utilizando sistemas de medición diseñado para altas tasas de flujo que se describen en el APTD-0581 o APTD-0576, pueden ser usadas previniendo que las especificaciones de este método se cumplan.

6.1.2. Barómetro. Se aceptan de mercurio, aneroide, o cualquier otro capaz de medir la presión atmosférica con una aproximación de 2,5 mm (0,1 pulgadas) de Hg.

**Nota:** La lectura de la presión barométrica puede ser obtenida de una estación meteorológica cercana, en este caso se debe hacer un ajuste del valor si es que existen diferencias de altura entre la estación y el punto donde se hace la medición (menos 2,5 mm (0,1 pulgadas) de mercurio por cada 30 metros (100 pies) de aumento de elevación o más 2,5 mm (0,1 pulgadas) mercurio por cada 30 metros (100 pies) de descenso de elevación).

6.1.3. Equipo para determinar la densidad del gas. El medidor de temperatura y presión como se describe en la sección 6.3 y 6.4 del Método 2, y el analizador de gases, si es necesario, como se describe en el Método 3. El sensor de temperatura debe estar preferiblemente, permanentemente unido al tubo pitot o a la sonda de muestreo en una configuración fija, tal que la punta del sensor se extienda más allá del borde de impacto de la envoltura de la sonda y no toque ningún metal. Alternativamente el sensor puede ser unido solo para que se permita su uso en campo.

**Nota:** Sin embargo, cuando el sensor de temperatura esté unido en campo, el sensor debe ser localizado en una estructura libre de interferencias con respecto a las aberturas del tubo pitot tipo S. (ver método 2 figura 2-4). Como una segunda alternativa si la diferencia del promedio de la medición de velocidad no es mayor a 1%, esta puede ser introducida y el sensor de temperatura no necesariamente debe ser unido a la sonda o al tubo pitot.

6.2. Recuperación de la muestra. Los siguientes numerales son requeridos para la realizar la recuperación de la muestra

6.2.1. Cepillos para la sonda y boquilla. Cepillos de cerdas de Nylon con el cable central en acero inoxidable con extensiones (por lo menos tan largo como sea la sonda) de acero inoxidable, nylon, teflón, o de material similar inerte; los cepillos deben ser de tamaño apropiado y que cubra la sonda y la boquilla.

6.2.2. Frascos lavadores. En vidrio o polietileno de capacidad de 500 ml, 2 unidades; se recomienda que la acetona no sea almacenada en envases de polietileno por más de un mes.

6.2.3. Contenedores (botellas) de vidrio. Botellas de vidrio borosilicato de resistencia química, para lavados de acetona, 500 ml o 1000 ml. Tapón de teflón o se construirán de forma que sea libre de fugas y resistente al ataque químico de la acetona. Alternativamente, las botellas de polietileno se pueden utilizar.

6.2.4. Caja Petri. De vidrio o borosilicato para recuperar el filtro.

6.2.5. Probeta graduada o Balanza analítica. Para medir el agua condensada con una aproximación de 1 ml o 0,5 g. La probeta graduada tendrá subdivisiones no superiores a 2 ml.

6.2.6. Contenedores de Plástico. Contenedores con sellos herméticos para almacenar silica gel.

6.2.7. Embudo y sellos de campo. Para la transferencia de la silica gel a un recipiente; no es necesaria si la silica gel es pesada en campo.

6.2.8. Embudo. De vidrio o polietileno, para recuperación de la muestra.

6.3. Análisis de la muestra. El siguiente equipo es requerido para el análisis de la muestra

6.3.1. Platos de vidrio para pesaje.

6.3.2. Desecador

6.3.3. Balanza analítica. Para mediciones con una aproximación de 0,1 mg.

6.3.4. Balanza. Para mediciones con una aproximación de 0,5 g.

6.3.5. Beakers. Con capacidad de 250 ml.

6.3.6. Higrómetro. Para medir la humedad relativa en el ambiente del laboratorio.

6.3.7. Sensor de temperatura. Para medir la temperatura en el ambiente del laboratorio.

## **7. REACTIVOS Y ESTANDARES.**

7.1. Toma de la muestra. Los siguientes reactivos son requeridos para la toma de la muestra.

7.1.1. Filtros: Filtros de fibra de vidrio, sin contenido orgánico, con un porcentaje de eficiencia de mínimo el 99,95% (< 0,05 % de penetración) en partículas de 0.3 micras de humo de dioctil ftalato. La prueba de eficiencia de los filtros debe estar direccionada de acuerdo con ASTM Method D 2986-71, 78, o 95a (incorporado por la referencia - ver §60.17) En fuentes donde exista un contenido de SO<sub>2</sub> ó SO<sub>3</sub>, el filtro deberá ser de un material que no reaccione con alguna de estas sustancias. En la referencia 10 de la sección 17 puede ser empleada para seleccionar al filtro adecuado.

7.1.2. Silica gel: Tipo indicador, debe tener una malla de 6 a 16. Si ha sido previamente usada, se debe secar a 175 °C (350 °F) por dos horas; en cambio si la silica es nueva puede ser usada tal como se recibe. Se puede utilizar otro tipo de desecantes (equivalentes ó mejores) los cuales estarán sujetos a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

7.1.3. Agua: Cuando se requiera analizar el material particulado recolectado en los burbujeadores, el agua a utilizar debe ser destilada y desionizada, de acuerdo con lo establecido en ASTM D 1193-77 o 91 Tipo 3 (incorporado por la referencia - ver §60.17). Corridas de blancos preliminares en campo, se utilizan para eliminar un blanco alto sobre la prueba de la muestra.

7.1.4. Hielo Triturado.

7.1.5. Grasa para cierre: Acetona insoluble. Debe ser resistente y estable al calor. Esta no es necesaria si los conectores se unen con teflón ó un material similar.

7.2. Recuperación de la muestra: Acetona (Calidad: ≤ 0,001) referente a porcentaje de residuos, debe estar en botellas de vidrio. Si la acetona es almacenada en un contenedor metálico, puede resultar con un alto contenido de residuos en el blanco, por lo cual no debería usarse. Algunas veces, los proveedores transfieren la acetona a botellas de vidrio desde contenedores de metal, de igual manera debe garantizar que el contenido de residuos presente en el blanco de acetona debe ser inferior a 0,001% del peso de la acetona. En ningún caso un valor de blanco debe ser superior de 0.001% del peso de la acetona si este es utilizado se restará del peso de la muestra.

7.3. Análisis de la muestra. Los siguientes reactivos son requeridos para realizar el análisis de la muestra.

7.3.1. Acetona. Igual que en el numeral 7.2.

7.3.2. Desecador. Sulfato anhídrido de calcio, Tipo indicador. Puede usarse otro tipo de desecador aprobado por la autoridad ambiental.

## **8. RECOLECCIÓN PRESERVACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE LA MUESTRA**

8.1. Preparación antes de la prueba. Se sugiere que el equipo de muestreo se mantenga de acuerdo a los procedimientos descritos en el APTD-0576.

8.1.1. Colocar entre 200 y 300 gramos de silica gel en contenedores cerrados al aire. Se debe pesar cada contenedor, incluyendo la silica gel con una aproximación de 0,5 g y registrar el peso. Como alternativa, la silica gel no necesita ser pre-pesada, pero deberá ser pesada directamente en su burbujeador o porta muestra justo antes de ensamblar el tren.

8.1.2. Realizar una inspección visual a los filtros a contraluz para detectar irregularidades, grietas o agujeros. Marcar los filtros del diámetro adecuado en el lado posterior cerca del borde, usando tinta de maquina numeradora. Como alternativa, se pueden marcar los contenedores de transporte (cajas Petri de vidrio o polietileno) y mantener cada filtro en su contenedor identificado en toda ocasión, excepto durante el muestreo.

8.1.3. Desechar los filtros a  $20 \pm 5,6$  °C ( $68 \pm 10$  °F) y presión ambiente por al menos 24 horas. Pesar cada filtro (o el filtro y el contenedor de transporte) en intervalos de al menos 6 horas hasta obtener un peso constante (por ejemplo diferencia  $\leq$  a 0,5 mg, con respecto al peso anterior). Registrar el resultado con una aproximación de 0,1 mg. Durante cada pesaje, el periodo en el cual el filtro está expuesto a la atmósfera del laboratorio debe ser menor a dos minutos. Alternativamente (a menos que se especifique otra cosa por parte de la autoridad ambiental), los filtros pueden ser secados en hornos a 105 °C (220 °F) de dos a tres horas, desecados por dos horas y pesados. Procedimientos diferentes a los descritos, que se usen para efectos de humedad relativa, pueden ser usados sujetos a la aprobación de la autoridad ambiental.

## 8.2. Determinaciones preliminares

8.2.1. Seleccionar el sitio de muestreo y el número mínimo de puntos transversales de acuerdo al Método 1 o como lo especifique la autoridad ambiental. Se debe determinar la presión de la chimenea, la temperatura y los rangos de cabeza de velocidad, utilizando el Método 2; se recomienda realizar prueba de fugas a las líneas del tubo pitot (Ver Método 2 sección 8.1). Se debe determinar el contenido de humedad en la chimenea, usando el procedimiento aproximado del Método 4 o sus alternativas con el propósito de hacer arreglos para el muestro isocinético. Se debe determinar el peso molecular base seca de los gases en la chimenea, como se describe en el Método 2; si se utiliza el muestreo integrado del Método 3 para determinar el peso molecular, la muestra en la bolsa integrada debe ser tomada simultáneamente y con la misma longitud de tiempo que la muestra de material particulado.

8.2.2. Seleccionar el tamaño de la boquilla basado en el rango de las cabezas de velocidad, de manera que no sea necesario cambiar el tamaño de la boquilla para mantener flujos de muestreo isocinéticos. Durante la ejecución, no se puede cambiar el tamaño de la boquilla. Se debe asegurar que se ha seleccionado el manómetro de presión diferencial adecuado para el rango de cabezas de velocidad encontrado (Ver Método 2)

8.2.3. Seleccionar una adecuada longitud de la sonda de tal forma que se puedan muestrear todos los puntos transversales. Para chimeneas grandes, se debe considerar el muestreo desde lados opuestos de la chimenea para reducir la longitud de la sonda.

8.2.4. Seleccionar el tiempo de muestreo total mayor o igual al tiempo de muestreo total mínimo especificado en los procedimientos de prueba para la actividad específica de manera que (1) el tiempo de muestreo por punto no sea menor a dos minutos (o algún intervalo de tiempo mayor especificado por la autoridad ambiental) y (2) el volumen de muestra tomado (corregido a las condiciones estándar) deberá exceder el volumen de muestra total de gas mínimo requerido. Esto último se basa en el promedio aproximado de flujo del muestreo.

8.2.5. El tiempo de muestreo en cada punto debe ser el mismo. Se recomienda que el número de minutos muestreado en cada punto sea un entero o un entero más medio minuto, con el fin de evitar errores al tomar el tiempo.



8.2.6. En algunas circunstancias (por ejemplo ciclos por lotes) puede ser necesario muestrear tiempos más cortos en los puntos transversales y obtener menores volúmenes de gas de muestra. En estos casos, se debe conseguir primero la aprobación de la autoridad ambiental.

### 8.3. Preparación del tren de muestreo

8.3.1. Durante la preparación y el ensamble del tren de muestreo, se deben mantener cubiertos todos los orificios donde pueda ocurrir contaminación hasta justo antes de ensamblar o hasta que inicie el muestreo. Se deben poner 100 ml de agua en cada uno de los dos primeros burbujeadores, dejar vacío el tercer burbujeador y transferir aproximadamente 200 a 300 gramos de silica gel previamente pesada al cuarto burbujeador. Se puede emplear más silica gel, pero se debe tener cuidado en asegurar que no es arrastrada fuera del burbujeador durante el muestreo. Se debe ubicar el contenedor en un lugar limpio para ser usado posteriormente durante la recuperación de la muestra. Alternativamente, el peso de la silica gel más el burbujeador puede ser determinado con una aproximación de 0,5 g, el cual debe ser registrado.

8.3.2. Utilizando pinzas o guantes quirúrgicos, se debe poner un filtro marcado (identificado) y pesado en el porta filtro. Se debe asegurar que el filtro esté adecuadamente centrado y que la junta esté adecuadamente situada para prevenir que la corriente de gas eluda el filtro. Se deben chequear posibles fracturas en el filtro después del ensamble.

8.3.3. Cuando se usan sondas de vidrio, se deben instalar las boquillas usando un empaque Viton A (O-ring) cuando las temperaturas en la chimenea son menores a 260 °C (500 °F) o un empaque de cordón resistente al calor cuando se tienen temperaturas más altas. Se pueden ver los detalles en el APTD-0576. Otros sistemas de conexión usando acero inoxidable 316 o férulas de teflón pueden ser usadas. Cuando se usan sondas metálicas, se deben instalar las boquillas como se mencionó anteriormente o con mecanismos de conexión directa y libre de fugas. Se debe marcar la sonda con cinta resistente al calor u otro método similar indicando la distancia adecuada dentro de la chimenea o ducto para cada punto de muestreo.

8.3.4. Se debe preparar el tren de muestreo como lo indica la Figura 5.1, usando (si es necesario) una capa ligera de grasa de silicona alrededor de todas las uniones de vidrio, engrasando solo la porción exterior (Ver APTD-0576) para evitar la posibilidad de contaminación por la grasa de silicona. Sujeto a la aprobación de la autoridad ambiental, se puede emplear un ciclón de vidrio entre la sonda y el porta filtro cuando se espere que el material particulado recolectado sea superior a 100 mg o cuando se presenten gotas de agua en el gas de la chimenea.

8.3.5. Agregue hielo picado alrededor de los burbujeadores.

### 8.4. Procedimientos de prueba de fugas

8.4.1. Prueba de fugas al sistema de medición (mostrado en la Figura 5.1). La parte del tren de muestreo, desde la bomba al orificio del medidor, debe ser probado para fugas antes del uso inicial y después de cada traslado. Las fugas después de la bomba darán como resultado el registro de un volumen menor al que se muestrea realmente. Se recomienda el siguiente procedimiento (Ver Figura 5.2): Se debe cerrar la válvula principal en la caja de medición. Se debe insertar un tapón de caucho con una manguera de caucho unida al orificio del tubo de salida. Se debe desconectar y ventilar el lado más bajo del manómetro de orificio. Se debe cerrar la parte inferior orificio. Se debe presurizar el sistema entre 13 y 18 cm de columna de agua (5 a 7 pulgadas) soplando a través de la manguera de caucho. Se debe pellizcar la tubería y observar el manómetro por un minuto. Una pérdida de presión en el manómetro indica una fuga en la caja de medición; si se presenta fuga, esta deberá ser corregida.

8.4.2. Prueba de fugas antes del muestreo: Una prueba de fugas antes del muestreo es recomendable pero no requerida. Si se realiza una prueba de fugas antes del muestreo, se debe seguir el siguiente procedimiento:

8.4.2.1. Después de que el tren de muestreo haya sido ensamblado, se deben encender y configurar el sistema de calentamiento del filtro y la sonda a las temperaturas de operación deseadas. Se debe permitir tiempo suficiente para estabilizar la temperatura. Si se utiliza un empaque Viton A (O-ring) u otra conexión que no permita fugas en el ensamble de la boquilla a la sonda, se debe realizar la prueba de fugas al tren en el sitio de muestreo taponando la boquilla y generando un vacío de 380 mm Hg (15 pulgadas).

**Nota** Se debe tener en cuenta que se puede utilizar un menor vacío si no se excede durante el muestreo

8.4.2.2. Si se usa un empaque de cordón resistente al calor, no se debe conectar la sonda al tren durante la prueba de fugas. En su lugar, se debe realizar la prueba de fugas al tren, taponando la entrada del porta filtro (ciclón, si aplica) y generando un vacío de 380 mm Hg (15 pulgadas). Posteriormente, se debe conectar la sonda al tren, y probar la fuga con un vacío aproximadamente de 25 mm Hg (1 pulgada); alternativamente, se puede probar la sonda con el resto del tren de muestreo, en un solo paso, con un vacío de 380 mm Hg (15 pulgadas). Tasas de fuga superiores al 4% de la tasa de muestreo promedio o 0,00057 m<sup>3</sup>/min (0,020 cfm), la que sea menor, son inaceptables.

8.4.2.3. Las siguientes instrucciones para prueba de fugas del tren de muestreo descrito en el APTD-0576 y APTD-0581 pueden ser útiles. Encienda la bomba con la válvula de by-pass completamente abierta y la válvula de ajuste grueso completamente cerrada. Abra parcialmente la válvula de ajuste grueso y cierre lentamente la válvula de by-pass hasta que se alcance el vacío deseado. No se debe invertir la dirección de la válvula de by-pass, ya que causaría que el agua ingrese al porta filtro. Si se sobrepasa el vacío deseado, se debe realizar la prueba de fugas con este vacío o terminar el proceso de prueba de fugas e iniciar de nuevo.

8.4.2.4. Cuando la prueba de fugas esté completa, primero se debe remover lentamente el tapón de la entrada de la sonda, el porta filtro o el ciclón (si aplica), e inmediatamente apagar la bomba de vacío. Esto previene que el agua de los burbujeadores se devuelva hacia el porta filtro y que la sílica gel ingrese al tercer burbujeador.

8.4.3. Pruebas de fugas durante el muestreo: Si durante el muestreo, se hace necesario el cambio de un componente (por ejemplo el ensamble del filtro o del burbujeador), se debe realizar una prueba de fugas inmediatamente antes de realizar el cambio. La prueba de fugas se debe realizar de acuerdo al procedimiento de prueba de fugas antes del muestreo, excepto que debe realizarse a una presión de vacío igual o mayor que el máximo valor registrado hasta ese punto de la prueba. Si la tasa de fuga se encuentra menor a 0,00057 m<sup>3</sup>/min o 4% de la tasa de muestreo promedio (la que sea menor), los resultados son aceptables, y no se requiere aplicar ninguna corrección al volumen total de gas seco medido; sin embargo, si se obtiene una tasa de fuga superior, se debe registrar la tasa de fuga y planear una corrección al volumen de la muestra (como se muestra en el numeral 12.3 de este método) o descartar el muestreo realizado.

**Nota** Se debe tener en cuenta que inmediatamente después de realizar el cambio de componentes, las pruebas de fugas son opcionales. Si se realizan las pruebas de fugas, se debe seguir el procedimiento descrito en el numeral 8.4.2.

8.4.4. Pruebas de fugas después del muestreo: Es obligatorio realizar una prueba de fugas del tren de muestreo al finalizar cada muestreo. La prueba de fugas se debe realizar de acuerdo al procedimiento de pruebas de fugas antes del muestreo (sección 8.4.2), excepto que debe ser realizado con un vacío igual o

mayor al máximo valor alcanzado durante el muestreo. Si la tasa de fuga no es mayor a  $0,00057 \text{ m}^3/\text{min}$  o 4% de la tasa de muestreo promedio (la que sea menor), los resultados son aceptables, y no se requiere aplicar ninguna corrección al volumen total de gas seco medido; sin embargo, si se obtiene una tasa de fuga superior, se debe registrar la tasa de fuga y planear una corrección al volumen de la muestra (como se muestra en el numeral 12.3 de este método) o descartar el muestreo realizado.

8.5. Operación del tren de muestreo. Durante el muestreo se debe mantener una tasa de muestreo isocinética (dentro del 10% del isocinétismo real, a menos que se especifique otra cosa por la autoridad ambiental) y una temperatura alrededor del filtro de  $120 \pm 14 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $248 \pm 25 \text{ }^\circ\text{F}$ ), o cualquier otra temperatura especificada por una sección de los estándares aprobados por la autoridad ambiental.

8.5.1. Para cada corrida se deben diligenciar los datos solicitados en un formulario como el de la Figura 5.3. Se debe asegurar registrar la lectura inicial del medidor de gas seco. Se deben registrar las lecturas del medidor de gas seco al inicio y final de cada incremento en el tiempo de muestreo, cuando se hagan cambios en el flujo de muestreo, antes y después de cada prueba de fugas y cuando el muestreo finalice. Se deben tomar las otras lecturas indicadas en la Figura 5.3 al menos una vez por cada punto de muestreo durante cada incremento de tiempo y lecturas adicionales cuando se presenten cambios significativos (20% de variación en las lecturas de cabeza de velocidad) requieran ajustes adicionales en la tasa de flujo. Se debe nivelar y poner en cero el manómetro. Debido a que el nivel y el cero del manómetro pueden cambiar debido a las vibraciones y los cambios de temperatura, se deben realizar revisiones periódicas durante la medición en los puntos transversales.

8.5.2. Se deben limpiar los puertos de muestreo, antes de realizar el muestreo para minimizar la posibilidad de recolectar material depositado. Para iniciar el muestreo, se debe verificar que los sistemas de calentamiento del filtro y de la sonda se encuentren a la temperatura indicada, se debe 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. Inmediatamente, se debe encender la bomba y ajustar el flujo a las condiciones de isocinétismo. Se pueden conseguir nomogramas que ayudan al ajuste rápido de la tasa de muestreo isocinética sin cálculos excesivos. Los nomogramas están diseñados para ser usados cuando el coeficiente del tubo pitot tipo S ( $C_p$ ) es de  $0,85 \pm 0,02$  y la densidad equivalente del gas de chimenea (peso molecular seco,  $M_d$ ) es igual a  $29 \pm 4$ . El APTD-0576 detalla el procedimiento para usar los nomogramas. Si el coeficiente del tubo pitot y la densidad equivalente del gas están por fuera de los rangos mencionados, no se deben usar los nomogramas a menos que se tomen las medidas adecuadas para compensar las desviaciones.

8.5.3. Cuando la chimenea está bajo una presión negativa que sea significativa, se debe tener cuidado de cerrar la válvula de ajuste grueso antes de insertar la sonda en la chimenea para prevenir que el agua se devuelva al porta filtro. Si es necesario, la bomba debe ser encendida con la válvula de ajuste grueso cerrada.

8.5.4. 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.

8.5.5. Se debe realizar la medición en el área transversal de la chimenea, como se requiere en el Método 1, siendo cuidadosos de no golpear la boquilla de la sonda contra las paredes de la chimenea cuando se muestrea cerca de las paredes o cuando se retira o se introduce la sonda a través de los puertos de muestreo; esto minimiza la posibilidad de extraer material depositado.

8.5.6. Durante el muestreo, se deben realizar ajustes periódicos para mantener la temperatura alrededor de la porta filtro a un nivel apropiado; se debe agregar más hielo, y si es necesario, sal para mantener una

temperatura menor a 20 °C (68 °F) en la salida del condensador y la salida de la silica gel. También, se debe revisar periódicamente el nivel y el cero del manómetro.

8.5.7. Si la caída de presión a través del filtro se vuelve demasiado alta, haciendo difícil mantener el muestreo isocinético, el filtro debe ser reemplazado en el transcurso del muestreo. Se recomienda utilizar otro montaje de filtro completo en lugar de intentar cambiar el filtro propiamente dicho. Antes de instalar un nuevo montaje de filtro, se debe realizar un procedimiento de prueba de fugas (ver sección 8.4.3). El peso total del material particulado deberá incluir la suma de lo capturado en los montajes del filtro.

8.5.8. Un solo tren de muestreo se debe usar para la ejecución del muestreo, excepto en casos donde se requiera muestreo simultáneo en dos o más ductos separados o en dos o más sitios diferentes dentro del mismo ducto, o en casos donde por fallas en el equipo se requiera un cambio de tren. En las demás situaciones, el uso de dos o más trenes está sujeto a aprobación de la autoridad ambiental.

**Nota:** Cuando se empleen dos o más trenes, se deben realizar análisis separados de lo capturado en la parte frontal de cada tren y (si aplica) de lo capturado en los burbujeadores, a menos que se hayan utilizado tamaños de boquillas idénticas en todos los trenes, caso en el que, lo capturado en la parte frontal de los trenes individuales debe ser combinado (así como lo capturado en los burbujeadores) y debe realizarse un análisis de lo capturado en la parte frontal y un análisis de lo capturado en los burbujeadores. Se debe consultar con la autoridad ambiental los detalles concernientes con los resultados de los cálculos cuando dos o más trenes se usen.

8.5.9. Al finalizar cada muestreo, se debe cerrar la válvula de ajuste grueso, retirar la sonda y la boquilla de la chimenea, apagar la bomba, registrar la lectura final del medidor de gas seco y realizar una prueba de fugas como se indica en el numeral 5.4.4. De igual manera, se debe realizar prueba de fugas a las líneas del tubo pitot, como se describe en el Método 2. Las líneas deben pasar esta prueba de fugas, con el fin de validar la información sobre cabeza de velocidad.

8.6. Cálculo del porcentaje isocinético. Se debe calcular el porcentaje de isocinétismo para determinar si el muestreo fue válido o se debe realizar otro muestreo (siguiendo los cálculos que se presentan en el numeral 12.11).

8.7. Recuperación de la muestra.

8.7.1. Al finalizar el periodo de muestreo, tan pronto como se retire la sonda de la chimenea, se debe empezar un procedimiento adecuado de limpieza. Esperando a que la sonda se enfríe.

8.7.2. Cuando la sonda pueda ser manejada con seguridad, se debe limpiar todo el material particulado externo cerca de la punta de la boquilla de la sonda y colocar la tapa sobre la boquilla para prevenir pérdidas o ganancias de material particulado. No se debe tapar la punta de la sonda justamente cuando el tren de muestreo se esté enfriando. Esto puede crear un vacío en el porta filtro, ocasionando arrastre de agua de los burbujeadores al porta filtro.

8.7.3. Antes de mover el tren de muestreo al sitio de limpieza, se debe retirar la sonda del tren de muestro, limpiar la grasa de silicona y tapar el lado abierto de la sonda. Se debe tener cuidado de no perder cualquier condensado que pueda estar presente. Se debe limpiar la grasa de silicona de la entrada del filtro donde se sujetó la sonda y se debe tapar. Se debe remover el cordón umbilical del último burbujeador y tapar el burbujeador. Si se usa una línea flexible entre el primer burbujeador o condensador y el porta filtro, se debe desconectar en el porta filtro y permitir que cualquier agua condensada o líquido drene hasta los burbujeadores o condensador. Después de limpiar la grasa de silicona, se debe tapar la salida del porta filtro y la entrada del burbujeador. Se pueden utilizar tapones de vidrio esmerilados, tapas plásticas o de cera para cerrar los agujeros.

8.7.4. Se debe trasladar la sonda y el montaje de filtro e burbujeador al área de limpieza. Esta área debe estar limpia y protegida del viento, de manera que se minimice la posibilidad de contaminación o pérdida de la muestra.

8.7.5. Se debe guardar una porción de la acetona usada para la limpieza como blanco. Se deben tomar 200 ml de esta acetona directamente de la botella de lavado que se esté utilizando y colocarla en un contenedor de muestra de vidrio marcado como “blanco de acetona”.

8.7.6. Se debe inspeccionar el tren antes y durante el desmontaje y anotar cualquier condición anormal. Se deben tratar las muestras como sigue:

8.7.6.1. Contenedor No. 1: Se debe remover cuidadosamente el filtro del porta filtro y colocarlo en su caja Petri identificada. Se deben usar un par de pinzas o guantes de cirugía desechables limpios para manejar el filtro. Si es necesario doblar el filtro, se debe hacer de manera que el material particulado quede dentro del doblado. Utilizando un cepillo seco con cerdas de Nylon o una paleta de borde afilado, se debe transferir cuidadosamente a la caja Petri cualquier material particulado o fibras del filtro que se hayan adherido al porta filtro. Se debe sellar el contenedor.

8.7.6.2. Contenedor No. 2: Teniendo cuidado de observar que el polvo en la parte exterior de la sonda o de otras superficies exteriores no queden en la muestra, se debe recuperar cuantitativamente el material particulado o cualquier condensado de la boquilla de la sonda, las uniones de la sonda, la sonda y la parte frontal del porta filtro, lavando dichos componentes con acetona y colocando el lavado en un contenedor de vidrio. Se puede utilizar agua destilada desionizada en lugar de acetona cuando sea aprobado por la autoridad ambiental y se debe utilizar cuando lo especifique la autoridad ambiental de orden nacional. En estos casos, se debe guardar un blanco de agua y seguir los lineamientos de la autoridad ambiental en el análisis. Se debe realizar el lavado con acetona como sigue:

8.7.6.2.1. Cuidadosamente se debe remover la boquilla de la sonda, limpiar la superficie interior lavando con acetona de la botella de lavado y limpiarla con un cepillo con cerdas de Nylon. Se debe limpiar hasta que la acetona no muestre partículas visibles, después de lo cual se debe hacer un lavado final de la superficie interior con acetona.

8.7.6.2.2. Se deben limpiar y lavar las partes internas de las uniones con acetona de manera similar hasta que no aparezcan partículas visibles.

8.7.6.2.3. Se debe lavar la sonda con acetona inclinando y rotando la sonda mientras se echa acetona desde su parte superior de manera que todas las superficies internas se mojen con acetona. Se debe permitir el drenaje de la acetona por la parte inferior hacia el contenedor de la muestra. Un embudo (vidrio o polietileno) puede ser utilizado para facilitar la transferencia de los líquidos del lavado al contenedor. Se debe continuar el lavado de acetona con un cepillo para la sonda. Se debe sostener la sonda en una posición inclinada, echar acetona en la parte superior a medida que se empuja el cepillo con un movimiento giratorio a través de la sonda; se debe mantener un contenedor por debajo de la parte inferior de la sonda y atrapar cualquier acetona y material particulado que se limpie de la sonda. Se debe limpiar con el cepillo tres veces o más hasta que no se extraiga material particulado visible con la acetona o hasta que no quede nada en la sonda por inspección visual. Con sondas de acero inoxidable u otros metales, se debe hacer la limpieza con el cepillo de la manera descrita por lo menos seis veces ya que las sondas metálicas tienen pequeñas grietas en las que se puede quedar atrapado el material particulado. Se debe limpiar el cepillo con acetona y recolectar cuantitativamente esos lavados en el contenedor de la muestra. Después del cepillado, se debe realizar un lavado final de la sonda con acetona.

8.7.6.2.4. Se recomienda que dos personas limpien la sonda para minimizar las pérdidas de muestra. Entre los muestreos se deben mantener los cepillos limpios y protegidos de contaminación.

8.7.6.2.5. Después de asegurarse que todas las uniones han sido limpiadas de grasa de silicona, se debe limpiar el interior de la parte frontal del porta filtro frotando las superficies con un cepillo con cerdas de Nylon y lavándolo con acetona. Se debe lavar cada superficie tres veces o más si se necesita para remover el material particulado visible. Se debe realizar un lavado final del cepillo y el porta filtro. Cuidadosamente también se debe lavar el ciclón de vidrio (si aplica). Después de haber realizado todos los lavados con acetona y recogido el material particulado en el contenedor, se debe ajustar la tapa del contenedor de manera que no se produzcan fugas de acetona cuando se transporta al laboratorio. Se debe marcar la altura del nivel de fluido para poder determinar si ocurren fugas durante el transporte. Se debe marca el contenedor para identificar claramente su contenido.

8.7.6.3. Contenedor No. 3: Se debe tener en cuenta el color de la silica gel para determinar si se ha gastado completamente y se debe hacer una anotación sobre su condición. Se debe transferir la silica gel del cuarto burbujeador a su contenedor original y se debe sellar. Un embudo puede facilitar el vertimiento de la silica gel para evitar pérdidas. Un agitador de caucho puede ser usado como ayuda para remover la silica gel del burbujeador. No es necesario remover la pequeña cantidad de partículas de polvo que se puedan adherir a la pared del burbujeador y son difíciles de remover. Teniendo en cuenta que la ganancia de peso se utilizará para realizar cálculos de humedad, no se debe usar agua u otros líquidos para transferir la silica gel. Si se puede conseguir una balanza en campo, se debe seguir el procedimiento para el contenedor No. 3 descrito en el numeral 11.2.3.

8.7.6.4. Agua de los burbujeadores: Se deben tratar los burbujeadores como sigue: Se deben realizar anotaciones sobre cualquier color o capa (película) en el líquido capturado. Se debe medir el líquido que está en los tres primeros burbujeadores con una aproximación de un mililitro, usando una probeta o pesándolos con una aproximación de 0,5 g usando una balanza. Se debe registrar el volumen o el peso del líquido presente. Esta información se requiere para calcular el contenido de humedad de la corriente de gas. Se debe desechar el líquido después de la medición y registrar el volumen o peso, a menos que se requiera un análisis del líquido capturado (ver nota, sección 6.1.1.8). Si se utiliza un tipo de condensador diferente, se debe medir la cantidad de humedad condensada ya sea volumétricamente o gravimétricamente.

8.8. Transporte de la muestra. Cuando sea posible, los contenedores deben ser transportados de tal manera que permanezcan derechos todo el tiempo.

## 9. CONTROL DE CALIDAD

9.1. Diversas medidas para asegurar el control de calidad.

<i>Sección</i>	<i>Mediciones de control de calidad</i>	<i>Efecto</i>
8.4,10.1-10.6	Verificación de fugas del Equipo de muestreo y calibración.	Garantizar la exactitud de medición de caudal de gas de la chimenea, el volumen de la muestra.

9.2. Verificación del sistema de medición de volumen: Los siguientes procedimientos se recomiendan para chequear la calibración del sistema de medición de volumen, por lo tanto son opcionales:

9.2.1. Verificación del orificio: utilizando el dato de calibración obtenido durante el procedimiento de calibración que se describe en el numeral 10.3, se determina el valor de  $H@$  del orificio del sistema de

medición. El  $\Delta H@$  es el diferencial de presión en el orificio en pulgadas de H<sub>2</sub>O y se correlaciona a 0,75 cfm de aire a 528 °R y 29,92 in Hg y se calcula como sigue:

$$\Delta H@ = 0,0319 \Delta H \frac{T_m \theta^2}{P_{bar} Y^2 V_m^2}$$

Donde:

$\Delta H$ : Presión diferencial promedio medida a través del orificio. in H<sub>2</sub>O.

$T_m$ : Temperatura absoluta promedio. °R.

$P_{bar}$ : Presión Barométrica. In Hg.

$\theta$ : Tiempo total de monitoreo, (min)

$Y$ : Factor de calibración. Adimensional.

$V_m$ : Volumen del gas de la muestra medido con el medidor de gas seco, cfm

$$0,0319 = \left( 0,0567 \frac{\text{in. Hg}}{^\circ\text{R}} \right) (0,75 \text{ cfm})^2$$

9.2.1.1. Antes de comenzar la prueba de campo (generalmente tres corridas constituyen una prueba de campo), se debe verificar el sistema de medición (Bomba, medidor de volumen y orificio), por un periodo de 10 minutos con el diferencial de presión  $\Delta H@$ . Registre el volumen colectado, la temperatura del medidor de gas seco y la presión barométrica. Se debe calcular el valor de  $Y_c$ , como se muestra a continuación.

$$Y_c = \frac{10}{V_m} \left[ \frac{0,0319 T_m}{P_{bar}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$Y_c$ : Valor de calibración del medidor de gas seco. Adimensional.

10: Tiempo de la corrida. (Minutos).

9.2.1.2. Se compara el valor de  $Y_c$  con el factor de calibración del medidor de gas seco  $Y$  para determinar si:  $0,97Y < Y_c < 1,03Y$ . Si el valor  $Y_c$  no está dentro de este rango, el sistema de medición del volumen, deberá ser verificado antes de comenzar la evaluación.

9.2.2. Calibración del orificio crítico: Se puede emplear un orificio crítico, calibrado contra un medidor de prueba húmeda o espirómetro, diseñado para ser insertado en la entrada de la caja de medición de muestreo, para hacer un chequeo siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 16.2.

## 10. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN

**Nota:** Mantenga en el laboratorio un registro de todas las calibraciones.

10.1. Boquilla de la sonda. Las boquillas de la sonda deben ser verificadas antes de su uso inicial en campo. Utilizando un micrómetro, mida el diámetro interior de la boquilla con una aproximación de 0,025 mm. Haga tres mediciones separadas utilizando diferente diámetro cada vez, y obtenga el promedio de las mediciones. La diferencia entre el mayor y el menor número no debe exceder 0,1 mm. Cuando las boquillas se cortan, se abollan o se corroen, deben ser reformadas, afiladas y recalibradas antes de su uso. Cada boquilla debe tener una identificación única y permanente.

10.2. Ensamblaje del tubo pitot. El ensamblaje del tubo pitot tipo S debe ser calibrado de acuerdo al procedimiento indicado en la sección 10.1 del Método 2.

### 10.3. Sistema de medición

10.3.1. Calibración previa al uso. El sistema de medición debe ser calibrado antes de su uso inicial en campo, de la siguiente manera: Conecte la entrada del sistema de medición a la salida del medidor de prueba húmeda cuya exactitud esté dentro del 1%. (Véase la Figura 5.4). El medidor de prueba húmeda debe tener una capacidad de 30 litros/rev. Para esta calibración puede emplearse un espirómetro de 400 litros o más, o su equivalente, aunque el medidor de prueba húmeda es usualmente más práctico. El medidor de prueba húmeda debe ser periódicamente calibrado con un espirómetro o un medidor de desplazamiento líquido para asegurar la exactitud del medidor. Pueden usarse espirómetros o medidores de prueba húmeda de otros tamaños, siempre y cuando se mantengan las exactitudes especificadas del procedimiento. Encienda la bomba del sistema de medición por unos quince (15) minutos con el manómetro de orificio indicando una lectura media según lo esperado en campo, para permitir que la bomba se caliente y la superficie interior del medidor de prueba húmeda se humedezca completamente. Luego, y como mínimo en tres ajustes del manómetro de orificio, pase una cantidad exacta de gas a través del medidor de prueba húmeda y anote el volumen de gas indicado por el medidor de gas seco. Anote también la presión barométrica y las temperaturas del medidor de prueba húmeda, de la entrada y de la salida del medidor de gas seco. Seleccione el mayor y el menor ajuste de orificio para determinar el rango de operación esperado del orificio en campo. Utilice un volumen mínimo de 0,14 m<sup>3</sup> para todos los ajustes del orificio. Registre toda la información en un formato similar a la Figura 5.5 y calcule el factor de calibración del medidor de gas seco (Y) y el factor de calibración del orificio ( $\Delta H_{@}$ ), para cada ajuste del orificio como se muestra en la Figura 5.5. En esta figura se presentan valores de tolerancias aceptables para Y y  $\Delta H_{@}$  individuales. Use el promedio de los valores de Y en los cálculos del numeral 12.0.

10.3.1.1. Antes de calibrar el sistema de medición es conveniente que se efectúe una verificación de fugas. Para los sistemas de medición que tienen bomba de diafragma, el procedimiento normal de revisión de fugas no detecta fugas dentro de la bomba. Para estos casos se sugiere el siguiente procedimiento: haga una calibración durante 10 minutos a 0,00057 m<sup>3</sup>/min. Al final de la corrida, tome la diferencia de los volúmenes medidos por el medidor de prueba húmeda y el medidor de gas seco. Divida la diferencia entre 10 para obtener la velocidad de fuga, la cual no debe exceder 0,00057 m<sup>3</sup>/min.

10.3.2. Calibración después del uso. Después de cada uso en campo, realice una verificación de la calibración del sistema de medición efectuando tres corridas utilizando un orificio intermedio (basado en la prueba de campo anterior), con el vacío ajustado en el máximo valor alcanzado durante las series de pruebas. Para ajustar el vacío, inserte una válvula entre el medidor de prueba húmeda y la entrada del sistema de medición. Calcule el valor promedio del factor de calibración del medidor de gas seco. Si el valor ha cambiado en más del 5%, recalibre el medidor a través del ajuste con el rango completo de orificios, como esta detalló en el numeral 10.3.1.

**NOTA.** Se pueden usar procedimientos alternativos (por ejemplo, revisar nuevamente el coeficiente del medidor del orificio), pero sujetos a la aprobación de la autoridad ambiental.



10.3.3. Variación aceptable en la calibración. Si los valores del coeficiente del medidor de gas seco obtenidos antes y después de una serie de pruebas difieren en más del 5%, la serie de pruebas debe ser invalidada, o los cálculos para la serie de pruebas deben ser realizados utilizando el valor del coeficiente del medidor (por ejemplo, antes o después), que dé el menor valor del volumen total de muestra.

10.4. Calibración del calentador de la sonda. Utilice una fuente de calor para generar aire caliente para las temperaturas seleccionadas que se aproximen a aquellas esperadas en las fuentes que serán muestreadas. Pase este aire a través de la sonda a una velocidad de flujo típica de la muestra, mientras se miden las temperaturas de entrada y salida de la sonda a varios ajustes del calentador de la sonda. Para cada temperatura de aire generada, haga una gráfica del ajuste del sistema de calentamiento de la sonda versus la temperatura de salida de la sonda. También puede usarse el procedimiento descrito en APTD-0576. Las sondas construidas de acuerdo al APTD-0581 no necesitan calibrarse si se usan las curvas de calibración de APTD-0576. Así mismo, las sondas con capacidad de monitoreo de la temperatura de salida no requieren calibración.

**Nota.** El sistema de calentamiento de la sonda debe calibrarse antes de su uso inicial en campo.

10.5. Sensores de temperatura. Utilice el procedimiento descrito en el método 2 para calibrar sensores de temperatura de chimenea. Termómetros de dial, como los utilizados para los medidores de gas seco y la salida del condensador, deben calibrarse contra termómetros de mercurio en vidrio.

10.6. Barómetro. Debe calibrarse contra un barómetro de mercurio.

## 11. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

11.1. Registre los datos requeridos en una hoja, tal como la que se muestra en la Figura 5.6

11.2. Maneje cada recipiente de muestra de la siguiente manera:

11.2.1. Recipiente No. 1. Deje el contenido en el recipiente de envío o transfiera el filtro y cualquier otra muestra de material particulado desde el recipiente de vidrio al plato de pesaje tarado. Deseque por 24 horas en un desecador que contenga sulfato de calcio anhidro. Pese a un peso constante, y reporte los resultados con una aproximación de 0,1 mg. El término "peso constante" representa una diferencia de no más de 0,5 mg o 1% del peso total menos el peso del recipiente, tome el que sea mayor, entre dos pesadas consecutivas, con no menos de 6 horas de tiempo de desecado entre un pesaje y el siguiente. Alternativamente, las muestras pueden ser secadas en horno a 104°C (220 °F) por 2 o 3 horas, enfriadas en el desecador y pesadas a un peso constante. Una vez enfriada la muestra, pésela y use este peso como el peso final.

11.2.2. Recipiente No. 2. Escriba el nivel de líquido en el recipiente y registre en la hoja de análisis cualquier fuga ocurrida durante el transporte. Si hay una cantidad considerable de fuga, se puede desechar la muestra o usar métodos aprobados por la autoridad ambiental, para corregir los resultados finales. Mida el líquido de este recipiente, ya sea volumétricamente a  $\pm 1$  ml o gravimétricamente a  $\pm 0,5$  g. Transfiera el contenido a un beaker de 250 ml tarado, y evapore hasta sequedad a temperatura y presión del ambiente. Deseque por 24 horas, y pese hasta peso constante. Reporte los resultados con una aproximación de 0,1 mg.

11.2.3. Recipiente No. 3. Pese la silica gel gastada (o la silica gel más el burbujeador) con una aproximación de 0,5 g usando una balanza. Esta etapa puede desarrollarse en campo.

11.2.4. Recipiente del blanco de acetona. Mida la acetona en su recipiente ya sea volumétrica o gravimétricamente. Transfiera la acetona a un beaker de 250 ml tarado, y evapore hasta sequedad a temperatura y presión del ambiente. Deseque por 24 horas, y pese hasta peso constante. Reporte los resultados con una aproximación de 0,1 mg.

**Nota:** Los contenidos del Recipiente No. 2 y del recipiente del blanco de acetona pueden ser evaporados a temperaturas mayores que el ambiente. Si la evaporación es realizada a una temperatura elevada, la temperatura debe estar por debajo del punto de ebullición del solvente; así mismo, para prevenir choques, el proceso de evaporación debe ser supervisado de cerca, y el contenido del beaker debe ser agitado ocasionalmente para mantener una temperatura homogénea. Tenga extremo cuidado, ya que la acetona es altamente inflamable y tiene un bajo punto de ebullición.

## 12. ANÁLISIS DE DATOS Y CÁLCULOS

Realice los cálculos, manteniendo al menos una cifra significativa adicional más allá de los datos adquiridos. Redondee las cifras después del cálculo final. Otras formas de ecuaciones pueden ser usadas, siempre y cuando se obtengan resultados equivalentes.

### 12.1. Nomenclatura

$A_n$  = Área transversal de la boquilla,  $m^2$

$B_{ws}$  = Vapor de agua en la corriente de gas, proporción por volumen

$C_a$  = Concentración de residuo del blanco de acetona, mg/mg

$C_s$  = Concentración de material particulado en el gas de chimenea, en base seca, corregida a condiciones estándar, g/dscm

$I$  = Porcentaje de muestra isocinética

$L_1$  = Velocidad de fuga individual observada durante la revisión de fuga realizada antes del primer cambio de componentes,  $m^3/min$

$L_a$  = Velocidad de fuga máxima aceptable para una revisión de fugas antes de la prueba o una revisión de fugas realizada después de un cambio de componentes; igual a  $0,00057 m^3/min$  o 4% de la velocidad de muestreo promedio, la que sea menor

$L_i$  = Velocidad de fuga individual observada durante la revisión de fugas realizada antes del cambio del componente "i" ( $i = 1, 2, 3...n$ ),  $m^3/min$

$L_p$  = Velocidad de fuga observada durante la revisión de fugas posterior a la prueba,  $m^3/min$

$m_a$  = Masa de residuo de acetona después de la evaporación, mg

$m_n$  = Cantidad total de material particulado recolectado, mg

$M_w$  = Peso molecular del agua, 18,0 g/g-mol

$P_{bar}$  = Presión barométrica en el sitio de muestreo, mm Hg

$P_s$  = Presión absoluta del gas de chimenea, mm Hg

$P_{std}$  = Presión absoluta estándar, 760 mm Hg

$R$  = Constante del gas ideal,  $0,06236 (mm\ Hg) (m^3) / (^{\circ}K) (g-mol)$

- $T_m$  = Temperatura absoluta promedio del medidor de gas seco (ver Figura 5.3), °K  
 $T_s$  = Temperatura absoluta promedio del gas de chimenea (ver Figura 5.3), °K  
 $T_{std}$  = Temperatura absoluta estándar, 293° K  
 $V_a$  = Volumen del blanco de acetona, ml  
 $V_{aw}$  = Volumen de acetona usada en el lavado, ml  
 $V_{lc}$  = Volumen total de líquido recolectado en los burbujeadores y la silica gel, ml  
 $V_m$  = Volumen de muestra de gas medido por el medidor de gas seco, dcm  
 $V_{m(std)}$  = Volumen de muestra de gas medido por el medidor de gas seco, corregido a condiciones estándar, dscm  
 $V_{w(std)}$  = Volumen de vapor de agua en la muestra de gas, corregido a condiciones estándar, scm  
 $v_s$  = Velocidad del gas de chimenea, calculada usando el Método 2, usando los datos obtenidos del Método 5, m/s  
 $W_a$  = Peso del residuo en el lavado de acetona, mg  
 $Y$  = Factor de calibración del medidor de gas seco  
 $\Delta H$  = Promedio de presión diferencial en el medidor de orificio (ver Figura 5.4), mm H<sub>2</sub>O  
 $\rho_a$  = Densidad de la acetona, mg/ml (ver etiqueta de la botella)  
 $\rho_w$  = Densidad del agua, 0,9982 g/ml  
 $\theta$  = Tiempo total de muestreo, min  
 $\theta_l$  = Intervalo de tiempo de muestreo, desde el principio de una prueba hasta el primer cambio de componentes, min  
 $\theta_i$  = Intervalo de tiempo de muestreo, entre dos cambios de componentes sucesivos, comenzando con el intervalo entre el primer y el segundo cambio, min  
 $\theta_p$  = Intervalo de tiempo de muestreo, desde el cambio final de componente (n°) hasta el final de la prueba de muestreo, min  
13,6 = Gravedad específica del mercurio  
60 = s/min  
100 = Conversión a porcentaje  
12.2. Temperatura promedio del medidor de gas seco y caída de presión promedio del orificio. Ver hoja de datos (Figura 5.3).

12.3. Volumen del gas seco. Corregir el volumen de muestra medido por el medidor de gas seco a condiciones estándar (20° C, 760 mm Hg ó 68 °F, 29.92 in. Hg) usando la Ecuación que sigue:

$$V_{m(std)} = V_m Y \frac{T_{std} \left[ (P_{bar}) + \left( \frac{\Delta H}{13,6} \right) \right]}{T_m P_{std}} \quad |$$

$$= K_1 V_m Y \frac{(P_{bar}) + \left( \frac{\Delta H}{13,6} \right)}{T_m}$$

Ecuación 1.

Donde:

$K_1 = 0,3858 \text{ } ^\circ\text{K/mm Hg}$  para unidades métricas ó  $17,64 \text{ } ^\circ\text{R/in}$  para unidades inglesas.

**Nota:** Esta ecuación puede usarse tal como está escrita a menos que la velocidad de fuga observada durante cualquiera de las revisiones de fuga obligatorias (por ejemplo, la verificación de fuga posterior a la prueba o las verificaciones de fuga realizadas antes de los cambios de componentes) exceda  $L_a$ . Si  $L_p$  o  $L_i$  exceden  $L_a$ , la Ecuación debe ser modificada de la siguiente manera:

a) Caso I. No se han hecho cambios de componentes durante el muestreo. En este caso, se debe sustituir  $V_m$  en la Ecuación 5-1 con la expresión:

$$\left[ V_m - (L_p - L_a) \theta \right]$$

b) Caso II. Durante el muestreo se hicieron uno o más cambios de componentes. En este caso, se debe sustituir  $V_m$  en la Ecuación 1 con la expresión:

$$\left[ V_m - (L_1 - L_a) \theta_1 - \sum_{i=2}^n ((L_i - L_a) \theta_i - (L_p - L_a) \theta_p) \right]$$

Y sustituir sólo aquellas velocidades de fuga ( $L_i$  o  $L_p$ ) que excedan  $L_a$ .

#### 12.4. Volumen del vapor de agua condensado

$$V_{w(std)} = V_{lc} \frac{P_w R T_{std}}{M_w P_{std}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$= K_2 V_{lc}$$

Donde:

$K_2 = 0,001333 \text{ m}^3/\text{ml}$  para unidades métricas ó  $0,04706 \text{ ft}^3/\text{ml}$  para unidades inglesas.

#### 12.5. Contenido de humedad

$$B_{ws} = \frac{V_{w(\text{std})}}{V_{m(\text{std})} + V_{w(\text{std})}} \quad \text{Ecuación 5-3}$$

**Nota:** En corrientes de gas saturadas, deben hacerse dos cálculos del contenido de humedad del gas de chimenea: una a partir del análisis del burbujeador (Ecuación 3) y otra a partir de la suposición de condiciones saturadas. El menor de los dos valores de  $B_{ws}$  se considerará correcto. El procedimiento para determinar el contenido de humedad suponiendo condiciones saturadas se presenta en el numeral 4 del Método 4. Para los propósitos de este método, la temperatura promedio del gas de chimenea de la Figura 5.3 puede usarse para hacer esta determinación, siempre y cuando la exactitud del sensor de temperatura del interior de la chimenea sea  $\pm 1^\circ \text{ C}$  ( $2^\circ \text{ F}$ ).

#### 12.6. Concentración del blanco de acetona

$$C_a = \frac{m_a}{V_a \rho_a} \quad \text{Ecuación 5-4}$$

#### 12.7. Blanco de lavado de acetona

$$W_a = C_a V_{aw} \rho_a \quad \text{Ecuación 5-5}$$

12.8. Peso de partículas totales. Determine el material particulado total recolectado, a partir de la suma de los pesos obtenidos de los recipientes 1 y 2 menos el blanco de acetona (ver Figura 5.6).

**Nota:** En ningún caso, un valor del blanco que sea mayor a 0,001% del peso de acetona usada, se debe restar del peso de muestra. Consulte el numeral 8.5.8 como ayuda para calcular los resultados que involucran dos o más montajes de filtro o dos o más trenes de muestreo.

#### 12.9. Concentración de partículas

$$C_s = \frac{K_3 m_n}{V_{m(\text{std})}} \quad \text{Ecuación 5-6}$$

Donde:

$K_3 = 0,001 \text{ g/mg}$  para unidades métricas ó  $0,0154 \text{ gr/mg}$  para unidades inglesas.

#### 12.10. Factores de conversión

De	A	Multiplicar por
ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0,02832
g	mg	64,80004
g/ft <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	2288,4
mg	g	0,001
g	lb	$1,429 \times 10^{-4}$

#### 12.11. Variación isocinética

##### 12.11.1. Cálculo a partir de los datos brutos

$$I = \frac{100T_s \left[ K_4 V_{lc} + \frac{(V_m Y)}{T_m} \left( P_{bar} + \frac{\Delta H}{13,6} \right) \right]}{60 \theta v_s P_s A_n} \quad \text{Ecuación 5-7}$$

Donde:

$$K_4 = 0,003454 \frac{(\text{mmHg})(\text{m}^3)}{(\text{ml})(^\circ\text{K})} \text{ para unidades métricas o } K_4 = 0,002669 \frac{(\text{in. Hg})(\text{ft}^3)}{(\text{ml})(^\circ\text{R})} \text{ para unidades inglesas.}$$

12.11.2. Cálculos a partir de los valores intermedios

$$I = \frac{T_s V_{m(\text{std})} P_{(\text{std})} 100}{T_{\text{std}} v_s 60 A_n P_s \theta (1 - B_{ws})} \quad \text{Ecuación 5-8}$$

$$= K_5 \frac{T_s V_{m(\text{std})}}{P_s v_s A_n \theta (1 - B_{ws})}$$

Donde:

$K_5 = 4,320$  para unidades métricas ó  $0,09450$  para unidades inglesas.

12.11.2. Resultados aceptables. Si  $90\% \leq I \leq 110\%$ , los resultados son aceptables. Si se considera que "I" esta por fuera de este rango, se deben rechazar los resultados y repetir el muestreo.

12.12. Velocidad del gas de chimenea y velocidad de flujo volumétrico. Calcule la velocidad promedio del gas de chimenea y la velocidad promedio de flujo volumétrico, si es necesario, usando los datos obtenidos en este método y las ecuaciones establecidas en las secciones 12.3 y 12.4 del Método 2.

**13. MEJORAMIENTO DEL METODO (RESERVADO)**

**14. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN [RESERVADO]**

**15. MANEJO DE RESIDUOS [RESERVADO]**

**16. PROCEDIMIENTOS ALTERNATIVOS**

16.1. Medidor de gas seco como un calibrador estándar: Un medidor de gas seco puede ser usado como un calibrador estándar para mediciones de volúmenes en lugar del medidor húmedo que se especificó en el numeral de calibración y estandarización en este método. Siempre y cuando este calibrado inicialmente y recalibrado periódicamente como sigue:

16.1.1. Calibración del Medidor de gas seco estándar:

16.1.1.1. El medidor de gas seco debe calibrarse y usarse como una referencia de medición secundaria que debe proveer una alta calidad y tener una capacidad de medición apropiada. (3 lt/rev) ó

(0,1 ft<sup>3</sup>/rev). Un espirómetro (400 litros (14 ft<sup>3</sup>) ó una mayor capacidad) ó su equivalente debería ser usado para esta calibración, aunque una prueba húmeda es usualmente más práctica. Una medición en base húmeda debería tener una capacidad de 30 lt/rev (1 ft<sup>3</sup>/min) y con una capacidad de medición de volumen dentro del 1%. Un medidor húmedo deberá ser verificado contra un espirómetro ó un medidor de desplazamiento líquido para asegurar la exactitud del medidor húmedo.

16.1.1.2. Se deben instalar los dispositivos como se muestra en la Figura 5.7. Un espirómetro ó su equivalente, puede ser usado en lugar de un medidor húmedo en el sistema. Se debe accionar la bomba mínimo por un tiempo de 5 minutos a una razón de flujo de 10 lt/min. (0,35 cfm) con el fin de acondicionar la superficie interior del medidor húmedo. La presión indicada por el manómetro a la entrada del medidor de gas seco, debería ser reducida. (No debe ser mayor a 100 mm H<sub>2</sub>O (4 in H<sub>2</sub>O a una razón de flujo de 30 lt/min (1 cfm). Esto se puede lograr con una diámetro amplio y asegurando adecuadamente las conexiones del sistema.

16.1.1.3. Registrar los datos en un formato como el que se muestra en la Figura 5.8. Hacer tres corridas en cada uno de los caudales y en no menos de cinco diferentes tipos de flujo. El rango de tasas de flujo debe estar entre 10 y 34 litros / min (0,35 y 1,2 cfm) o por encima del rango de funcionamiento esperado.

16.1.1.4. Cálculo de la razón de flujo. Para cada uno de las corridas se debe usar el medidor de volumen húmedo. V<sub>w</sub> y se debe registrar el tiempo. θ. Se debe calcular el coeficiente del medidor de gas seco, Y<sub>ds</sub> para cada corrida, por medio de los siguientes cálculos:

$$Q = K_1 \frac{P_{bar} V_w}{(T_w + T_{std}) \theta} \quad \text{Ecuación 5-9.}$$

$$Y_{ds} = \frac{V_w (T_{ds} + T_{std}) P_{bar}}{V_{ds} (T_w + T_{std}) \left( P_{bar} + \frac{\Delta p}{13,6} \right)} \quad \text{Ecuación 5-10.}$$

Donde:

K1: 0,3858 °C/mm Hg por unidades métricas. ó 17,64 °F/in. Hg para unidades inglesas.

V<sub>w</sub>: Volumen en el medidor de humedad. lt (ft<sup>3</sup>)

V<sub>ds</sub>: Volumen en el medidor de gas seco. lt (ft<sup>3</sup>)

T<sub>ds</sub>: Temperatura promedio en el medidor de gas seco °C.

T<sub>adj</sub>: 273°C para unidades métricas (460 °F para unidades inglesas).

T<sub>w</sub>: Temperatura promedio en el medidor de humedad. °C (°F).

P<sub>bar</sub>: Presión barométrico. mm Hg (in. Hg).

Δp: Diferencia de presión a la entrada del medidor de gas seco. mm H<sub>2</sub>O.

θ: Duración de la corrida. (min)



16.1.1.5. Se deben comparar los tres valores de  $Y_{ds}$  para cada una de las razones de flujo y determinar el valor máximo y mínimo. La diferencia entre el valor máximo y el mínimo de las razones de flujo, no debe ser superior a 0,030. Se podrán realizar corridas por triplicado para cumplir con este requisito. Adicionalmente, los coeficientes de medición deberán estar entre 0,95 y 1,05. Si estas especificaciones no se satisfacen luego de tres corridas sucesivas por triplicado, el medidor no se considera apropiado como patrón de calibración y no debería ser usado como tal. Si se cumplen estas especificaciones, se deben promediar los tres valores de  $Y_{ds}$  resultantes en cada tasa de flujo en no menos de cinco (5) promedios de coeficientes medidos,  $Y_{ds}$ .

16.1.1.6. Se debe preparar la curva del coeficiente del medidor,  $Y_{ds}$ , con respecto al caudal ó razón de flujo (Q) para el medidor de gas seco. Esta curva debería ser usada como referencia cuando el medidor sea utilizado para calibrar otro medidor de gas seco y para determinar cuándo es requerida una recalibración.

16.1.2. Recalibración del medidor de gas seco estándar.

16.1.2.1. Recalibre anualmente el medidor de gas seco estándar contra un medidor húmedo ó un espirómetro o después de cada 200 horas de operación, lo que ocurra primero. Esto anterior es válido siempre que el medidor de gas seco estándar se mantenga en el laboratorio y en el caso que sea transportado se debe tener el mismo cuidado como cualquier otro instrumento de laboratorio. El mal trato del medidor de gas seco estándar, puede ocasionar cambios en la calibración y requerirá más frecuentes recalibraciones.

16.1.2.2. Como alternativa a la recalibración completa, se puede hacer un chequeo a la calibración en dos puntos. Siga el mismo procedimiento y estructura de equipos así como para una recalibración completa, pero la corrida del medidor a solo dos (2) tasas de flujo (las tasas sugeridas son 14 y 30 Litros/min (0.5 y 1 cfm)). Calcule el coeficiente del medidor para esos dos puntos y compare los valores con la curva de calibración del medidor. Si los dos (2) coeficientes están dentro de 1.5 por ciento de los valores de la curva de calibración a tasas de flujo iguales, el medidor no necesita ser recalibrado hasta la siguiente fecha por chequeo de recalibración.

16.2. Orificio crítico como calibración estándar. El orificio crítico puede ser usado como calibración estándar en lugar del medidor húmedo especificado anteriormente Sección 16.1, siempre y cuando estén calibrados y se siga el siguiente procedimiento:

16.2.1. Selección del orificio crítico:

16.2.1.1. El siguiente procedimiento describe el uso de agujas hipodérmicas ó tubos delgados de acero inoxidable que se consideran idóneos para ser usados como orificios críticos (i.e. un vacío crítico puede ser obtenido, como se describe en la sección 16.2.2.2.3). Se seleccionan cinco orificios críticos que han sido adecuadamente medidos para cubrir un rango de caudal entre 10 y 34 lt/min (0,35 y 1,2 cfm) ó el rango de operación esperado. Dos de los orificios críticos deberán encontrarse dentro del rango de operación esperado. Un mínimo de tres orificios críticos son necesarios para la calibración del medidor de gas seco en este método; los otros dos orificios críticos pueden ser utilizados como repuesto y proporcionar una mejor selección de soporte para el rango de flujos de operación. Los tamaños de agujas y longitud de tubos se muestran en la tabla 5-1 sección 18, dando tasas de flujo aproximadas

16.2.1.2. Estas agujas pueden ser adaptadas para el método 5 para el siguiente tipo de tren de muestreo: Insertando un tapón de botella de suero 13 por 20 mm tipo manga, introduzca ½ pulgada al conector rápido Swagelok (o equivalente). Inserte la aguja dentro del tapón como se muestra en la figura 5-9.

16.2.2. Calibración del orificio crítico. El procedimiento descrito en esta sección emplea la configuración de la caja del medidor del método 5 con el medidor de gas seco DGM descrito en la sección 6.1.1.9, para calibrar con orificios críticos.

16.2.2.1. Se debe realizar la calibración de la caja de medición ó control bajo la misma configuración bajo la cual va a ser utilizada (no debe haber conexiones en la entrada del orificio).

16.2.2.1.1. Antes de realizar la calibración del medidor, se debe verificar la existencia de fugas como se muestra a continuación: Abra totalmente la válvula de ajuste grueso y cierre totalmente la válvula de ajuste fino. Tape la entrada y encienda la bomba; determine de este modo si existen fugas en el sistema. La tasa de fuga deberá ser cero. (No se debe detectar movimiento en el marcador del medidor de gas seco por cerca de un minuto).

16.2.2.1.2. Se deben además verificar las fugas en el tren de muestreo, entre la bomba y el orificio del medidor. Si se presentan fugas, se deben realizar las correcciones ó reparaciones necesarias en las conexiones, los empaques u otros elementos.

16.2.2.1.3. Luego de la determinación de fugas en el medidor, este debe ser calibrado como ya se mostró anteriormente en este método (numeral 10.3.). Asegúrese que el medidor de la prueba húmeda cumpla con los requerimientos fijados en la sección 16.1.1.1. Chequee el nivel del agua del medidor húmedo. Registre el factores de calibración del Medidor de Gas Seco, Y.

16.2.2.2. Calibración de orificios críticos. Instale los equipos como se muestra en la figura 5-10

16.2.2.2.1. Se debe dar un tiempo de precalentamiento de alrededor de 15 minutos. Este es un paso importante para equilibrar las condiciones de temperatura del medidor de gas seco.

16.2.2.2.2. Realice el chequeo de las fugas al sistema de acuerdo con el numeral 16.2.2.1.1 la tasa de fugas debe ser cero (s).

16.2.2.2.3. Antes de realizar la calibración del orificio crítico, se debe determinar las condiciones de operación como sigue: Se debe abrir totalmente la válvula de ajuste grueso y posteriormente ajustar la válvula de ajuste fino hasta conseguir una lectura de vacío correspondiente a la mitad de la presión atmosférica (15 in. Hg). Observando la medición del manómetro en la caja de control,  $\Delta H$ . Aumente el vacío hasta que obtenga una lectura estable y registre el valor de vacío para cada uno de los orificios. Aquellos orificios en los que no se pueda determinar un valor crítico, no deberán utilizarse.

16.2.2.2.4. Obtenga la presión barométrica utilizando un barómetro como se describe en la sección 6.1.2., registre la presión barométrica,  $P_{bar}$ , en mm Hg (in Hg).

16.2.2.2.5. Realice corridas dobles en un vacío entre 25 a 50 mm Hg (1 a 2 in Hg) sobre el vacío crítico las corridas deben ser de por lo menos 5 min cada una. Las lecturas del volumen en el DGM deben ser en incrementos de giros completos del DGM. De modo de guía, los tiempos no deben ser diferentes por más de 3.0 segundos (esto incluye tolerancia para cambios de temperatura del DGM), para lograr  $\pm 0.5\%$  en  $K'$  (ver ecuación 11). Registre la información enumerada en la figura 5-11

16.2.2.2.6. Calcule  $K'$  usando la ecuación 5-11 :

$$K' = \frac{K_1 V_m Y \left( P_{\text{bar}} + \frac{\Delta H}{13,6} \right) (T_{\text{amb}})^{1/2}}{P_{\text{bar}} T_m \theta} \quad \text{Ecuación 5-11.}$$

Donde:

$$K': \text{Coeficiente del Orificio Crítico, } \frac{[(\text{m}^3)(^\circ\text{K})^{1/2}]}{[(\text{mmHg})(\text{min})]} \text{ o } \frac{[(\text{ft}^3)(^\circ\text{R})^{1/2}]}{[(\text{in. Hg})(\text{min})]}$$

Tamb: Temperatura Absoluta Ambiental, °K (°R).

Calcular el promedio aritmético de los valores de K'. Los valores individuales de K' no deberán diferir en mas de ± 0,5 % del valor promedio.

16.2.3. Usando los orificios críticos como estándar de calibración.

16.2.3.1. Registre la presión barométrica

16.2.3.2. Calibre el sistema de medición de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 16.2.2. Registre la información solicitada en la figura 5-12.

16.2.3.3. Calcule el volumen de aire estándar que pasa a través de medidor de gas seco y del orificio; luego calcule el factor de calibración, Y, del medidor de gas seco, usando la siguiente ecuación:

$$V_{m(\text{std})} = K_1 V_m \frac{\left( P_{\text{bar}} + \frac{\Delta H}{13,6} \right)}{T_m} \quad \text{Ecuación 5-12}$$

$$V_{\text{cr}(\text{std})} = K_1 \frac{(P_{\text{bar}} \theta)}{\sqrt{T_{\text{amb}}}} \quad \text{Ecuación 5-13}$$

$$Y = \frac{V_{\text{cr}(\text{std})}}{V_{m(\text{std})}} \quad \text{Ecuación 5-14}$$

Donde:

Vcr(std) = Volumen de la muestra de gas pasando a través del orificio, corregido a condiciones estándar, dscm (dscf).

K1 = 0,3858 °K/mm Hg. Para unidades métricas

17,64 °R/in. Hg. Para unidades inglesas.

16.2.3.4. Promedie los valores de calibración del medidor de gas seco para cada tasa de flujo. El factor de calibración, Y, de cada tasa de flujo no debe diferir en más de  $\pm 2\%$  del promedio.

16.2.3.5. Para determinar la necesidad de recalibrar los orificios críticos, compare los factores de calibración, Y, del medidor de gas seco obtenidos a partir de dos orificios adyacentes cada que el medidor de gas seco se calibra, por ejemplo, para comprobar el orificio 13/2.5, utilice los orificios 12/10.2 y 13/5.1. Si cualquier factor de calibración Y difiere en más del 2 % con respecto a los demás, recalibre el orificio crítico de acuerdo con el procedimiento del numeral 16.2.2.

## 17. REFERENCIAS

1. Addendum to Specifications for Incinerator Testing at Federal Facilities. PHS, NCAPC. December 6, 1967.
2. Martin, Robert M. Construction Details of Isokinetic Source-Sampling Equipment. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC. APTD-0581. April 1971.
3. Rom, Jerome J. Maintenance, Calibration, and Operation of Isokinetic Source Sampling Equipment. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC. APTD-0576. March 1972.
4. Smith, W.S., R.T. Shigehara, and W.F. Todd. A Method of Interpreting Stack Sampling Data. Paper Presented at the 63rd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, St. Louis, MO. June 14-19, 1970.
5. Smith, W.S., et al. Stack Gas Sampling Improved and Simplified With New Equipment. APCA Paper No. 67-119. 1967.
6. Specifications for Incinerator Testing at Federal Facilities. PHS, NCAPC. 1967.
7. Shigehara, R.T. Adjustment in the EPA Nomograph for Different Pitot Tube Coefficients and Dry Molecular Weights. Stack Sampling News 2:4-11. October 1974.
8. Vollaro, R.F. A Survey of Commercially Available Instrumentation for the Measurement of Low-Range Gas Velocities. U.S. Environmental Protection Agency, Emission Measurement Branch. Research Triangle Park, NC. November 1976 (unpublished paper).
9. Annual Book of ASTM Standards. Part 26. Gaseous Fuels; Coal and Coke; Atmospheric Analysis. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. 1974. pp. 617-622.
10. Felix, L.G., G.I. Clinard, G.E. Lacy, and J.D. McCain. Inertial Cascade Impactor Substrate Media for Flue Gas Sampling. U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC 27711. Publication No. EPA- 600/7-77-060. June 1977. 83 pp.
11. Westlin, P.R. and R.T. Shigehara. Procedure for Calibrating and Using Dry Gas Volume Meters as Calibration. Standards. Source Evaluation Society Newsletter. 3(1):17- 30. February 1978.
12. Lodge, J.P., Jr., J.B. Pate, B.E. Ammons, and G.A. Swanson. The Use of Hypodermic Needles as Critical Orifices in Air Sampling. J. Air Pollution Control Association. 16:197-200. 1966.

**18. TABLAS, DIAGRAMAS, CARTAS DE FLUJO, Y VALIDACIÓN DE DATOS.**

Calibre/cm	Tasa de flujo (ml/min)	Calibre/cm	Tasa de flujo (ml/min)
12/7.6	32.56	14/2.5	19.54
12/10.2	30.02	14/5.1	17.27
13/2.5	25.77	14/7.6	16.14
13/5.1	23.50	15/3.2	14.16
13/7.6	22.37	15/7.6	11.61
13/10.2	20.67	15/10.2	10.48

Figura 5.1. Tren de muestreo para la medición de material particulado

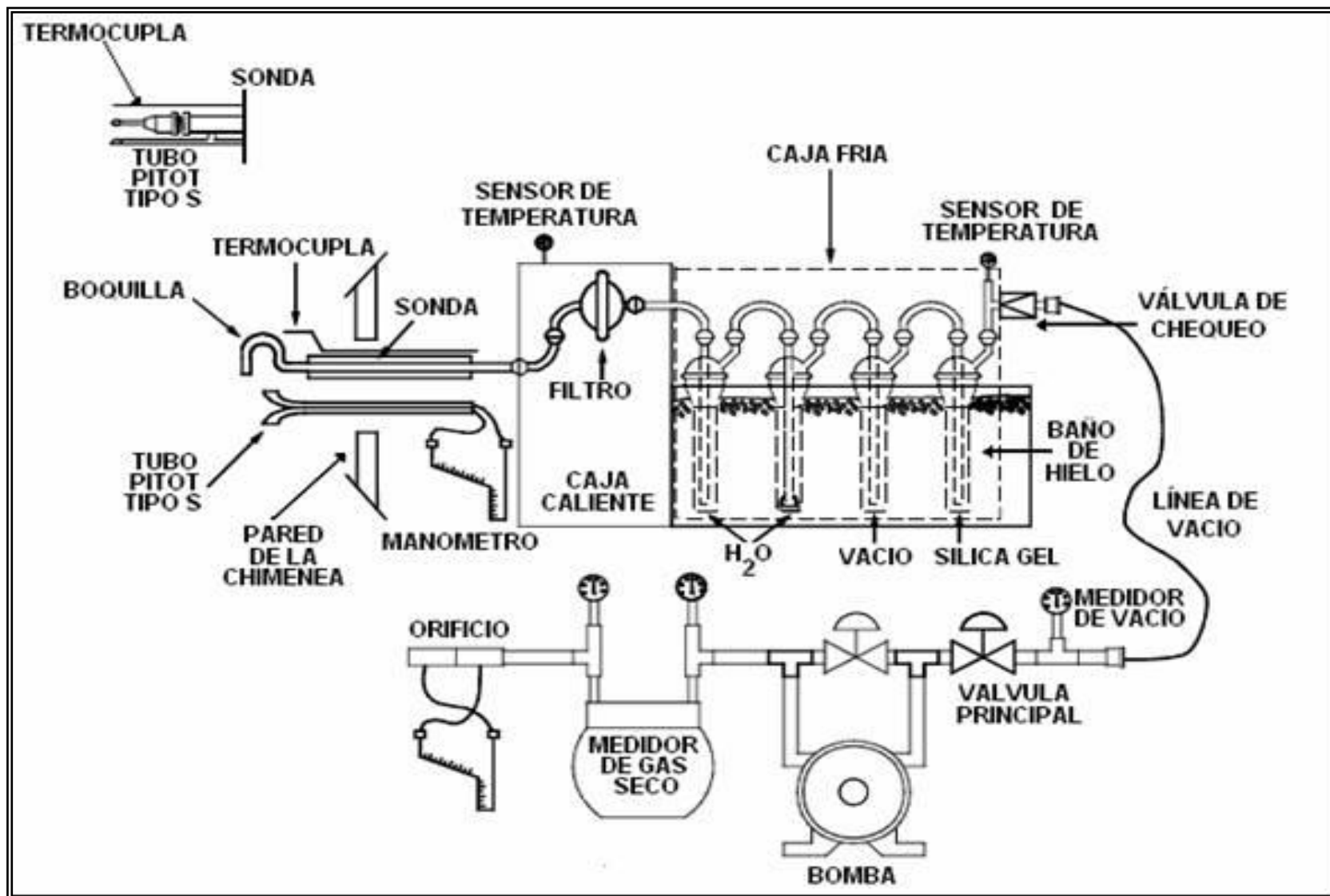


Figura 5.2. Prueba de fugas en el Sistema de Medición

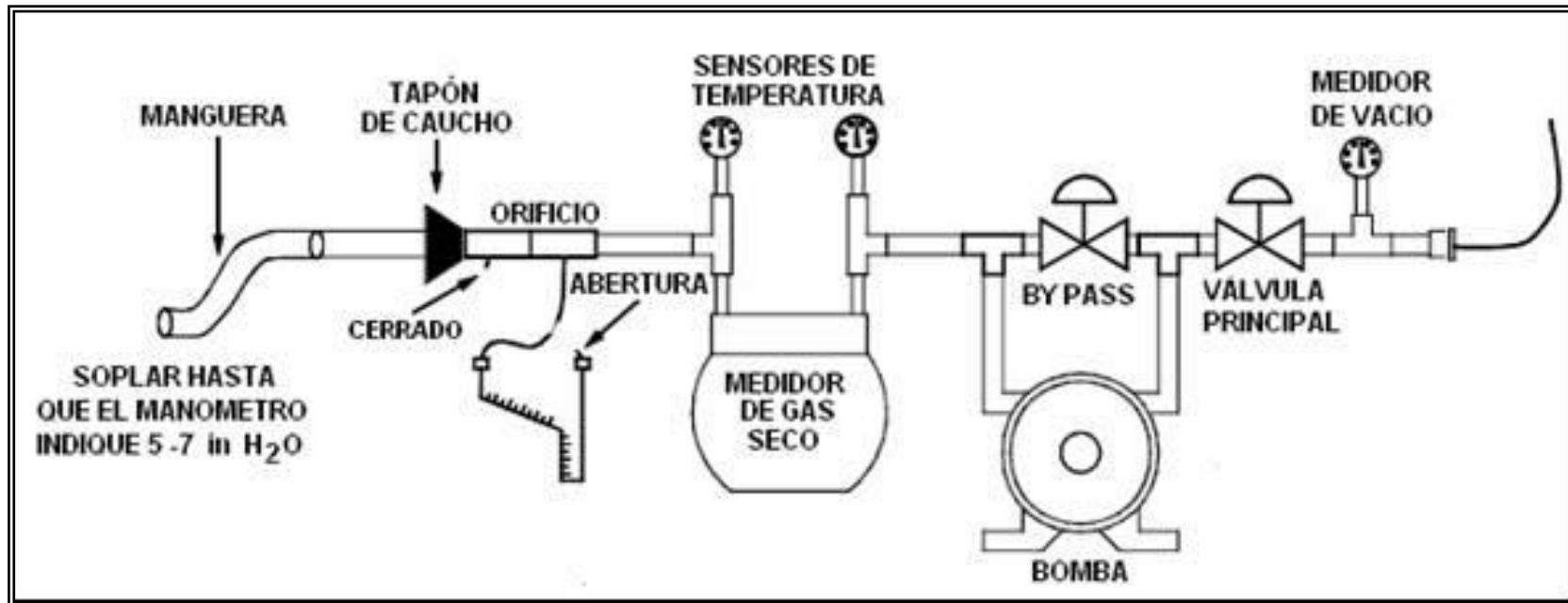






Figura 5. 4. Montaje del equipo de calibración del Sistema de Medición.

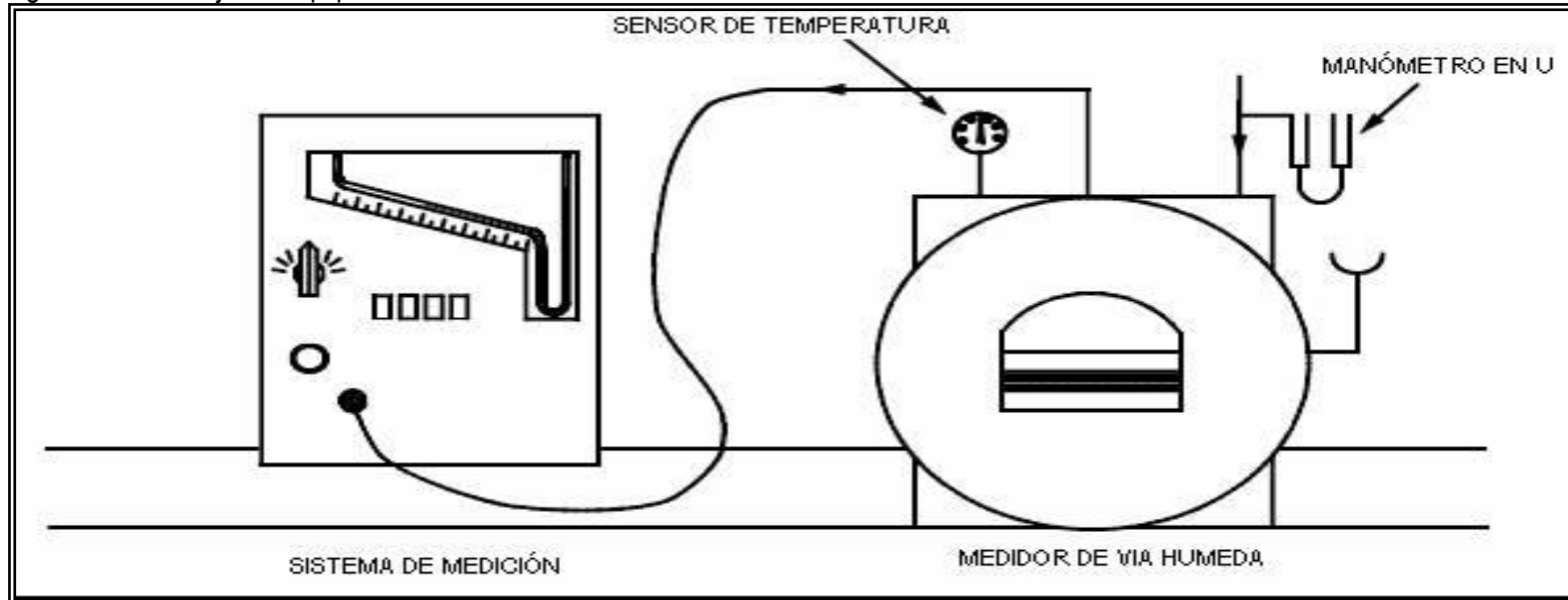


Figura 5- 5. Ejemplo de Hoja de campo para la calibración del sistema de medición

Fecha: \_\_\_\_\_ Identificación del sistema de medición: \_\_\_\_\_

Presión barométrica,  $P_b =$  \_\_\_\_\_ mm Hg

Ajuste del manómetro del orificio $\Delta H$ mm H <sub>2</sub> O	Volumen del gas espirómetro (medidor húmedo), $V_w$ m <sup>3</sup>	Volumen del medidor de gas seco, $V_m$ m <sup>3</sup>	TEMPERATURAS				Tiempo, $\theta$ min
			Espirómetro (medidor húmedo), $T_w$ °C	Medidor de gas seco			
				Entrada $T_i$ °C	Salida $T_o$ °C	Promedio $T_m$ °C	
CALCULOS							
$\Delta H$	Y				$\Delta H@$		
mm H <sub>2</sub> O							
Promedio							

Y = Relación entre la lectura del medidor de prueba húmeda y el medidor de prueba seca; la tolerancia para los valores individuales es de  $\pm 0,02$  a partir del promedio.

$\Delta H@$  = Presión diferencial del orificio que equivale a 0,75 cfm de aire a 68°F y 29,92 pulgadas de mercurio, pulgadas de H<sub>2</sub>O; la tolerancia para los valores individuales es de  $\pm 0,20$  a partir del promedio.

Figura 5.6. Hoja de Datos Analíticos.

Planta _____	Fecha _____
Corrida No. _____	Filtro No. _____
Cantidad de líquido perdido durante el transporte _____	
Volumen del blanco de Acetona, ml _____	
Concentración del blanco de Acetona, mg/mg (Ecuación 5-4) _____	
Blanco del lavado de Acetona, mg (Ecuación 5-5) _____	

Número de recipiente	Peso de partículas recolectadas, mg		
	Peso final	Peso de la tara	Peso ganado
1.			
2.			
Total			
Menos blanco de acetona			
Peso de material particulado			
	Volumen de agua recolectada		
	Volumen del burbujeador, ml	Peso de silica gel, g	
Final .....		g*      ml	
Inicial .....			
Volumen total de líquido recolectado.....			

\* Convertir el peso de agua a volumen, dividiendo el incremento total de peso entre la densidad del agua (1 g/ml).

$$\frac{\text{Incremento, g}}{\text{(g/ml)}} = \text{Volumen} \cdot \text{de} \cdot \text{agua, ml}$$

Figura 5.7. Montaje del Equipo para la calibración del medidor de gas seco.

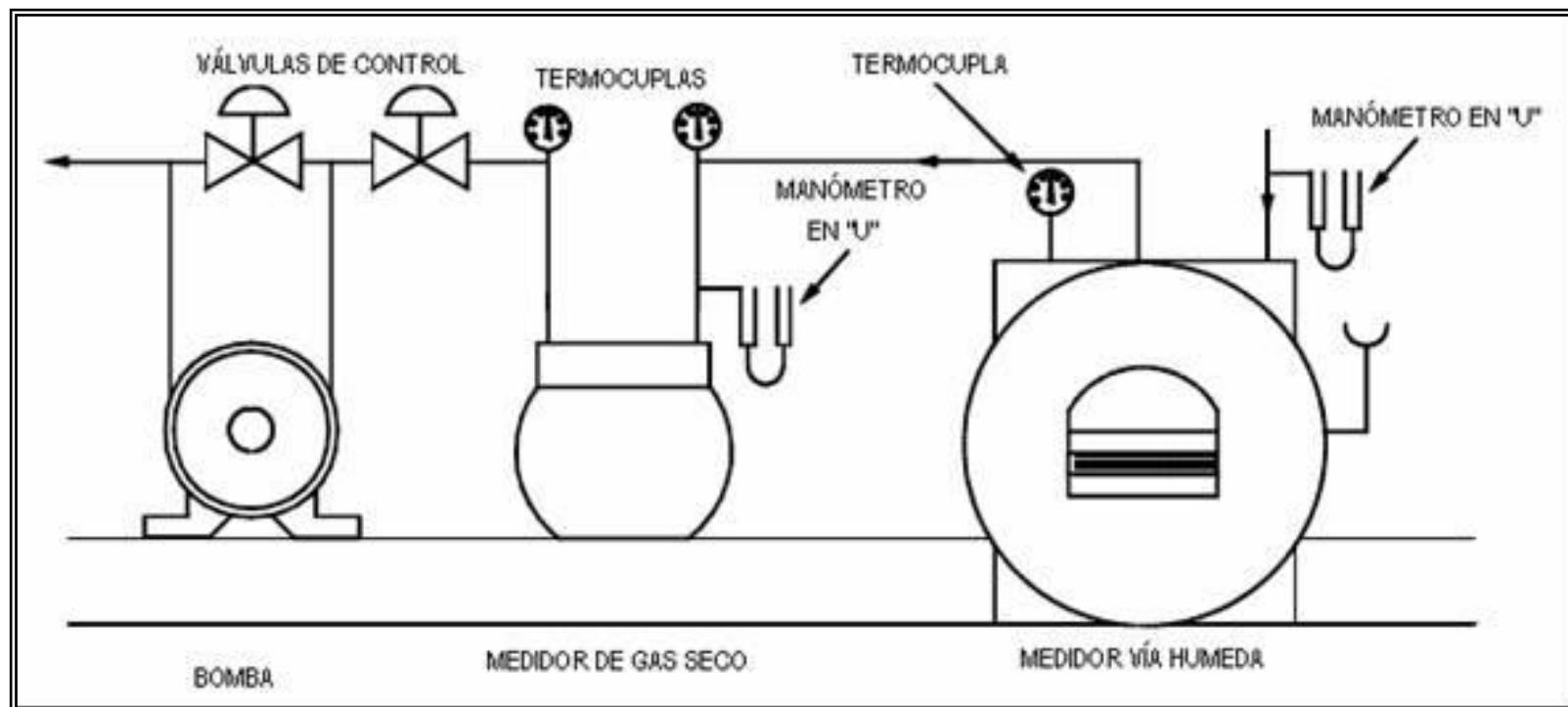


Figura 5.8. Ejemplo de una hoja de datos para una calibración estándar de un medidor de gas seco con un medidor de gas húmedo.

Fecha: \_\_\_\_\_

Identificación de medidor de gas seco: \_\_\_\_\_

Presión barométrica  $P_{bar}$ : \_\_\_\_\_ in. Hg

Tasa de flujo aproximada (Q)	Espirómetro (Medidor húmedo) ( $V_s$ ) m <sup>3</sup>	Volumen del medidor de gas seco ( $V_{dg}$ ) m <sup>3</sup>	Temperaturas			Presión del medidor de gas seco ( $\Delta P$ ) mm. H <sub>2</sub> O	Tiempo	Tasa de flujo (Q) m <sup>3</sup> /min	Coeficiente del medidor ( $Y_{ds}$ )	Promedio del Coeficiente del medidor ( $Y_{ds}$ )
			Espirómetro (Medidor húmedo) ( $T_s$ ) °C	Medidor de gas seco						
				Entrada ( $T_i$ ) °C	Salida ( $T_o$ ) °C					
0,40										
0,60										
0,80										
1,00										
1,20										

$$Q = K_1 \frac{P_{bar} V_w}{(T_w + T_{std}) \theta}$$

$$Y_{ds} = \frac{V_w (T_{ds} + T_{std}) P_{bar}}{V_{ds} (T_w + T_{std}) \left( P_{bar} + \frac{\Delta p}{13,6} \right)}$$

Figura 5-9. Adaptación de orificio crítico al sistema de medición del Método 5.

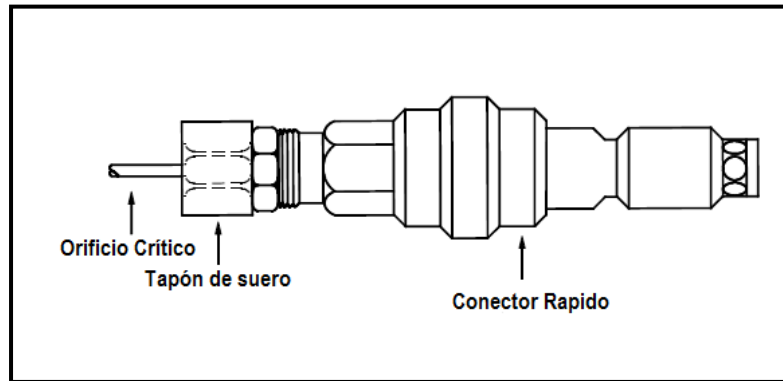


Figura 5-10. Instalación del aparato

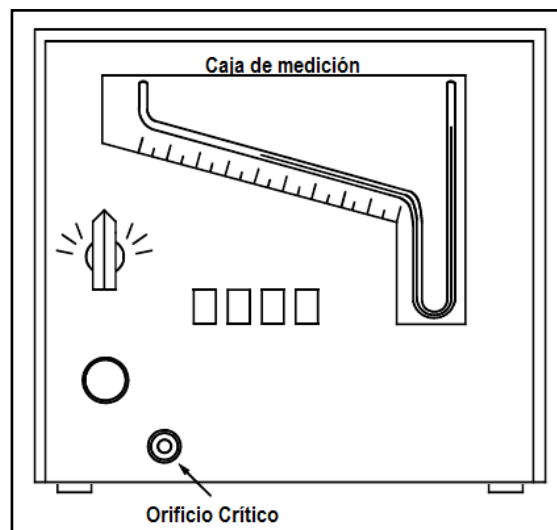


Figura 5-11. Hoja de datos para determinar el factor  $K'$ .

Fecha: \_\_\_\_\_ Factor Cal. DMG: \_\_\_\_\_  
 ID Tren \_\_\_\_\_ ID orificio Crítico \_\_\_\_\_

Medidor de gas seco	Unidades	Recorrido No.	
		1	2
Lectura Final.....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Lectura Inicial.....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Diferencia V <sub>m</sub> .....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Entrada/salida Temperaturas	.....	/	/
Inicial .....	°C (°F) .....	.....	.....
Final.....	°C (°F) .....	.....	.....
Promedio Temp, T <sub>m</sub> .....	°C (°F) .....	.....	.....
Tiempo $\theta$ .....	min.....	.....	.....
Lect Manóm Orificio., $\Delta H$ .....	mm (in.) H <sub>2</sub> O.....	.....	.....
Presión Barométrica, P <sub>bar</sub> .....	mm (in.) Hg.....	.....	.....
Tempe Amb, T <sub>amb</sub> .....	°C (°F) .....	.....	.....
Presión Vacío .....	mm (in.) Hg.....	.....	.....
V <sub>m</sub> (std).....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
V <sub>cr</sub> (std) .....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Factor Cal DGM. Y .....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....

Figura 5-12. Hoja de datos para determinar el factor Y del DGM.

Fecha: \_\_\_\_\_ ID orificio Crítico : \_\_\_\_\_  
 ID Tren \_\_\_\_\_ Factor  $K'$  del orificio crítico \_\_\_\_\_

Medidor de gas seco	Unidades	Recorrido No.	
		1	2
Lectura Final.....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Lectura Inicial.....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Diferencia V <sub>m</sub> .....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Entrada/salida Temperaturas	.....	/	/
Inicial .....	°C (°F) .....	.....	.....
Final.....	°C (°F) .....	.....	.....
Promedio Temp, T <sub>m</sub> .....	°C (°F) .....	.....	.....
Tiempo $\theta$ .....	min.....	.....	.....
Lect Manóm Orificio., $\Delta H$ .....	mm (in.) H <sub>2</sub> O.....	.....	.....
Presión Barométrica, P <sub>bar</sub> .....	mm (in.) Hg.....	.....	.....
Tempe Amb, T <sub>amb</sub> .....	°C (°F) .....	.....	.....
Presión Vacío .....	mm (in.) Hg.....	.....	.....
V <sub>m</sub> (std).....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
V <sub>cr</sub> (std) .....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....
Factor Cal DGM. Y .....	m <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> ) .....	.....	.....