



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

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

**METODO 2 — DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD Y TASA DE FLUJO
VOLUMÉTRICA DE GASES EN CHIMENEA (TUBO PITOT TIPO S)**

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. EQUIPO Y SUMINISTROS.	3
7. REACTIVOS Y NORMAS. [RESERVADO]	6
8. COLECCIÓN DE LA MUESTRA, Y ANÁLISIS	6
9. CONTROL DE CALIDAD.	6
10. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN.....	7
11. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO	10
13. MÉTODO DE EJECUCIÓN.	13
14. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN [RESERVADO]	13
15. MANEJO DE RESIDUOS [RESERVADO]	13
16. REFERENCIAS	13
17. TABLAS, DIAGRAMAS, CARTAS DE FLUJO, Y VALIDACIÓN DE DATOS.....	15

Nota: Este método no incluye la totalidad de las especificaciones (por ejemplo, equipo y suministros) y los procedimientos (por ejemplo, muestreo y análisis) esenciales para su desempeño. Algunos materiales son incorporados por referencia de otros métodos en este documento. Por lo tanto, para obtener resultados confiables, las personas que utilizan este método deben tener un amplio conocimiento de al menos los siguientes métodos de ensayo adicionales: Método 1.

1. ALCANCE Y APLICACIÓN

1.1 Este método es aplicable para la medición de la velocidad promedio de una corriente gaseosa y para determinar el flujo gaseoso.

1.2 Este método no es aplicable en sitios de medición que no cumplan los criterios del Método 1, Sección 11.1. El método tampoco puede ser usado para medición directa en corrientes gaseosas ciclónicas o de remolino; la sección 11.4 del Método 1 demuestra cómo determinar las condiciones de flujo ciclónico o de remolino. Cuando existan condiciones inaceptables, se deben usar procedimientos alternos sujetos a la aprobación de la autoridad ambiental. Para realizar determinaciones exactas de la tasa de flujo; ejemplos de esos procedimientos alternos son : (1) aletas reforzadas; (2) calcular la tasa de flujo volumétrico total estequiométricamente, o (3) moverse hacia otro sitio de medición en el que el flujo sea aceptable.

1.3 **Objetivos de Calidad de datos.** La fidelidad de los requisitos de este método mejora la calidad de los datos obtenidos de los métodos de muestreo de contaminantes atmosféricos.

2. RESUMEN DEL MÉTODO

2.1 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" (Tipo Stausscheibe o tubo pitot tipo reverso).

3. DEFINICIONES. [RESERVADO]

4. INTERFERENCIAS. [RESERVADO]

5. SEGURIDAD.

5.1 Cláusula de exención de responsabilidad. Este método puede involucrar 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. EQUIPO Y SUMINISTROS.

A continuación se dan las especificaciones de los aparatos. Cualquier otro aparato del que se haya demostrado que es capaz (sujeto a la aprobación de la autoridad ambiental), de cumplir las especificaciones, será considerado aceptable.

6.1 Tubo Pitot Tipo "S".

6.1.1 El tubo Pitot Tipo "S" (Figura 2-1) debe estar hecho de metal (por ejemplo acero inoxidable). Se recomienda que el diámetro de tubo externo (Dimensión Dt Figura 2-2b) sea entre 0.48 y 0.95

centímetros (3/16 y 3/8 de pulgada). Debe haber una distancia igual desde la base de cada "pata" del tubo Pitot hasta la cara plana de apertura (dimensiones P_A y P_B Figura 2-2b); se recomienda que la distancia sea 1.05 a 1.50 veces el diámetro externo del ducto. Las caras abiertas del tubo Pitot, preferiblemente, deben estar alineadas como se muestra en la figura 2-2; sin embargo, una desalineación ligera es permisible. (Ver figura 2-3).

6.1.2 El tubo Pitot de tipo "S" debe tener un coeficiente conocido, que se determina según se explica en la sección 10.0. Se le debe asignar un número de identificación al tubo Pitot; este número se debe marcar o grabar permanentemente en el cuerpo del tubo. Se puede usar un tubo Pitot estándar en lugar de un tipo "S", siempre y cuando cumpla con las especificaciones de las secciones 6.7 y 10.2. Nótese, sin embargo, que los orificios de presión estática y de impacto de los tubos Pitot estándar son susceptibles de atascarse en corrientes gaseosas con partículas. Por lo tanto, cuando se usen tubo Pitot estándar para realizar mediciones transversales, se debe recubrir con la protección adecuada de manera que las aperturas del tubo Pitot no se atasquen durante el período transverso. Esto se puede hacer tomando la lectura de la cabeza de velocidad (Δp) en el punto transversal final (lectura valor Δp) limpiar los orificios estáticos y de impacto del tubo Pitot estándar por medio de "purga" con aire a presión, y luego se toma otra lectura Δp . Si las lecturas Δp hechas antes y después de la purga con aire son las mismas (± 5 por ciento), los datos del transverso son aceptables. De otro modo, hay que rechazar la prueba. Nótese que si Δp en el punto transversal final es injustificadamente bajo, se puede seleccionar otro punto. Si la "purga" a intervalos regulares es parte del procedimiento, entonces se deben tomar lecturas Δp comparativas, como las anteriores, para las dos últimas purgas en las cuales se observen lecturas Δp justificadamente altas.

6.2 Medida de la Presión Diferencial. Se usa un manómetro inclinado o aparato equivalente. La mayoría de los equipos de muestreo están equipados con un manómetro inclinado vertical de 10 pulgadas (columna de agua) que tiene divisiones de 0,01 pulgadas H_2O en una escala vertical de 0 a 1 pulgadas y 0.1 pulgadas H_2O de división en una escala vertical de 1 a 10. Esta clase de manómetro (u otra de sensibilidad equivalente) es satisfactorio para medir los valores Δp tan pequeños como 1,27 mm (0,05 pulgadas) H_2O . Sin embargo, se debe usar un medidor de presión diferencial de mayor sensibilidad (sujeto a la aprobación de la autoridad ambiental), si se encuentra que cualquiera de las siguientes cosas es verdadera: (1) el promedio aritmético de todas las lecturas Δp en los puntos transversos es menor que 1,27 mm (0,05 pulgadas) H_2O ; (2) para transversos de 12 o más puntos, más del 10 por ciento de las lecturas individuales Δp están por debajo de 1,27 mm (0,05 pulgadas) H_2O ; o (3) para transversos menores de 12 puntos, más de una lectura Δp por debajo de 1,27 mm (0,05 pulgadas) H_2O . La cita N° 18 en la referencia describe los instrumentos disponibles comercialmente para la medición de velocidades de gas de rango bajo.

6.2.1 Como alternativa a los criterios anteriores (1) a (3), la ecuación 2-1 (sección 12.2), debe ser usada para determinar la necesidad usar un medidor de presión diferencial más sensible. Si T es mayor que 1.05, los datos de cabeza de velocidad son inaceptables y se debe usar un medidor de presión diferencial más sensible.

NOTA: Si se usan medidores de presión diferencial diferentes a los manómetros inclinados (por ejemplo, manómetros magnehelic), se debe revisar su calibración después de cada serie de pruebas. Para revisar la calibración de un manómetro diferencial, compare las lecturas Δp del manómetro con las de un manómetro de aceite en mínimo tres puntos que representen el rango de los valores Δp en la chimenea. Si, en cada punto, los valores de Δp leídos por el medidor de presión diferencial y por el manómetro de aceite concuerdan hasta dentro de un 5 por ciento, se debe considerar el manómetro de presión diferencial dentro de la calibración adecuada. De otro modo, la serie de pruebas debe ser

desechada o los procedimientos ajustados a los valores Δp medidos, y los resultados se deben usar sujetos a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

6.3 Sensor de Temperatura. Se deben usar termocupla, termómetro de bulbo lleno con líquido, termómetro bi-metálico, termómetro de vidrio con mercurio u otro medidor capaz de medir temperatura dentro de un mínimo de 1.5 por ciento de la temperatura absoluta mínima de chimenea. El sensor de temperatura se debe conectar al tubo Pitot de manera que la parte del sensor no toque ningún metal; el medidor debe estar libre de interferencias con respecto a los extremos abiertos del tubo Pitot (Ver Figura 2-1 y Figura 2-4). Se pueden usar posiciones alternas si el sistema de medición de temperatura del tubo Pitot está calibrado de acuerdo al procedimiento de la sección 10.0. Teniendo en cuenta que se obtenga una diferencia de no más del 1 por ciento en la medición de la velocidad promedio, el medidor de temperatura no se necesita estar conectado al tubo Pitot; esta alternativa está sujeta a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

6.4 Sonda y Medidor de Presión. Se usa un piezómetro y un manómetro de tubo en "U" lleno de mercurio o agua capaz de medir presión en chimenea dentro de 2.5 mm Hg (0,1 pulgadas de Hg). La conexión estática de un tubo Pitot tipo estándar o una "pata" de un tubo Pitot tipo "S" con las aperturas paralelas al flujo de gas también se pueden usar como sonda de presión.

6.5 Barómetros. Se puede usar un barómetro de mercurio, aneroides u otro capaz de medir presión atmosférica dentro de un rango de 2,54 mm Hg (0,1 pulgadas de Hg).

Nota: En muchos casos la lectura barométrica se puede obtener de una Estación Climática Nacional cercana, en cuyo caso se puede pedir el valor de la estación (que es la presión barométrica absoluta) y se puede aplicar un ajuste por diferencia de elevación entre la estación climática y el punto de muestreo a una tasa de menos 2,5 mm Hg (0,1 pulgadas de Hg) por cada 30 metros (100 pies) de aumento de elevación o viceversa para la disminución de altura.

6.6 Equipo para la Determinación de la Densidad del Gas. Se puede usar el equipo del método 3, si se necesita (ver sección 8.6) para determinar el peso molecular del gas seco, y el equipo del Método 4 para la determinación del contenido de humedad (método de referencia) o el Método 5; se pueden usar otros métodos sujetos a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

6.7 Calibración del Tubo Pitot. Cuando sea necesaria la calibración de un tubo Pitot tipo "S" (ver sección 10.1), se usa un tubo Pitot estándar como referencia. El tubo Pitot estándar debe tener preferiblemente un coeficiente conocido obtenido (1) o directamente de la Oficina Nacional de Normas (National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg MD 20899, (301) 975-2002, o (2) o por medio de otra calibración con otro tubo Pitot estándar con un coeficiente trazable NIST. En forma alternativa, se puede usar un tubo Pitot estándar diseñado de acuerdo con los criterios expuestos en las secciones 6.7.1 a 6.7.5 a continuación e ilustrados en la Figura 2-5 (ver también citas 7, 8 y 17 den la sección 17.0). Los tubos Pitot diseñados bajo estas especificaciones tendrán coeficientes de base cercanos a 0.99 ± 0.01 .

6.7.1 Diseño del Pitot estándar

6.7.1.1 Conexión hemisférica, elipsoidal o cónica (se muestra en la Figura 2 – 5)

6.7.1.2 Se deben tomar un mínimo de seis diámetros entre los orificios de presión estática y la línea central del tubo externo siguiendo el codo de 90 grados.

6.7.1.3 Se deben tomar un mínimo de ocho diámetros entre los orificios de presión estática y la línea central del tubo externo, siguiendo el codo de 90 grados.

6.7.1.4 Orificios de presión estática de tamaño igual (aproximadamente 0,1 D), espaciados en forma pareja en un piezómetro de configuración de anillo.

6.7.1.5 Codo de 90 grados con unión curva o caperuza.

6.8 Calibración del medidor de Presión Diferencial Tubo Pitot de tipo "S" Se usa un manómetro inclinado o su equivalente. Si se usa la técnica de calibración de velocidad individual (ver sección

10.1.2.3), la calibración del medidor de presión diferencial deben ser legibles en los siguientes 0.127 mm H₂O (0.005 pulgadas de H₂O). Para calibraciones múltiples de velocidad, el medidor debe ser legible en los siguientes 0.127 mm H₂O (0.005 pulgadas de H₂O) para valores Δp entre 1.27 y 25.4 mm de H₂O (0.05 y 1.00 pulgadas de H₂O) y en los siguientes 1.27 mm H₂O (0.05 pulgadas de H₂O) para valores Δp mayores de 25.4 mm H₂O (1.00 pulgadas de H₂O). Se requerirá un medidor especial más sensible para leer valores Δp menores de 1.27 mm H₂O (0.05 pulgadas de H₂O). (ver cita 18 en la sección 16.0).

7. REACTIVOS Y NORMAS. [RESERVADO]

8. COLECCIÓN DE LA MUESTRA, Y ANÁLISIS

8.1 Coloque el aparato como se muestra en la Figura 2 –1. Los tubos capilares o una cámara de compensación instalados entre el manómetro y el tubo Pitot para corregir las fluctuaciones Δp. Se recomienda, pero no se necesita, que se haga con anterioridad una prueba de fugas o escapes de la manera siguiente: (1) sopla por la apertura de impacto del tubo Pitot hasta que se registre al menos 7.6 cm (3 pulgadas) de H₂O de velocidad de presión en el manómetro, luego cierre la cara de impacto. La presión debe permanecer estable durante al menos 15 segundos; (2), haga lo mismo con el lado de presión estática, excepto que use la succión para obtener un mínimo de 7.6 cm (3 pulgadas) de H₂O. Se pueden usar otros procedimientos de revisión de fugas sujetos a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

8.2 Nivele el manómetro a cero. Como el nivel del manómetro y el cero pueden variar debido a vibraciones y cambios de temperatura, haga revisiones periódicas durante el transverso. Registre todos los datos necesarios como se muestra en la hoja de datos de ejemplo (Figura 2 – 6).

8.3 Mida la cabeza de velocidad y la temperatura en los puntos transversos especificados en el Método 1. Asegúrese de usar el medidor de presión diferencial adecuado para el rango de valores Δp encontrados (ver sección 6-2). Si es necesario cambiar a un medidor más sensible, hágalo, y vuelva a tomar las lecturas Δp y de temperatura en cada punto transverso. Haga una revisión posterior de fugas (obligatorio), como se describió en la sección 3.1 anteriormente, para validar la prueba de transversos.

8.4 Mida la presión estática en la chimenea. Generalmente una lectura es suficiente.

8.5 Determine la presión atmosférica.

8.6 Determine el peso molecular seco del gas en la chimenea. Para procesos de combustión o procesos que emitan esencialmente CO₂, O₂, CO y N₂, use el método 3. Para procesos que emitan esencialmente aire, no se necesita hacer análisis; use un peso molecular seco de 29.0. Para otros procesos, se deben usar otros métodos sujetos a la aprobación de la autoridad ambiental.

8.7 Obtenga el contenido de humedad a partir del Método 4 (o su equivalente) o a partir del Método 5.

8.8 Determine el área transversal de la chimenea o ducto en el lugar de muestreo. Cuando sea posible, mida físicamente las dimensiones en vez de usar heliografías (planos).

9. CONTROL DE CALIDAD.

<i>sección</i>	<i>Mediciones de calidad y control</i>	<i>sensibilidad</i>
10.1- 10.4	Calibración del equipo de muestreo	Garantizar la medición exacta del caudal de gas en la chimenea, volumen de la muestra.

10. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN

10.1 Tipo de tubo Pitot en "S". Antes de su primer uso, examine cuidadosamente el tubo Pitot tipo "S" en las vistas superior, lateral e inferior para verificar que las aperturas del tubo estén alineadas dentro de las especificaciones ilustradas en la figura 2 – 2 y 2 – 3. El tubo Pitot no se debe usar si no cumple estas especificaciones de alineación. Después de verificar la alineación de las caras de apertura, mida y registre las siguientes dimensiones del tubo Pitot: (a) diámetro externo del tubo (dimensión Dt, Figura 2 – 2b); y (b) las distancias de la base a la apertura (dimensiones P_A y P_B Figura 2 – 2b). Si Dt se encuentra entre 0.48 y 0.95 cm (3/16 y 3/8 de pulgada) y si P_A y P_B son iguales y entre 1.05 y 1.50 Dt, hay dos opciones posibles: **(1)** El tubo Pitot se puede calibrar de acuerdo con el procedimiento descrito en las secciones 10.1.2 a 10.1.5 a continuación, o **(2)** se le puede asignar un coeficiente de base (como tubo aislado) de 0.84. Nótese, de todos modos, que si el tubo Pitot es parte de un montaje o ensamblaje, aún se puede requerir calibración, a pesar de que se conozca el valor del coeficiente de base (ver sección 10.1.1). Si Dt, P_A y P_B están fuera de los límites especificados, el tubo Pitot se debe calibrar como se especifica en 10.1.2 a 10.1.5 a continuación.

10.1.1 Montajes de Tubo Pitot Tipo "S". Durante los transversos de muestreo y velocidad, no siempre se usa el tubo Pitot tipo "S" aislado; en muchos casos, se usa el tubo Pitot en combinación con otros componentes de muestreo (por ejemplo., termocupla, sonda de muestreo, boquillas) como parte de un "montaje o ensamblaje". La presencia de otros componentes de muestreo a veces puede afectar el coeficiente del valor de base del tubo Pitot tipo "S" (cita 9 en la sección 17.0); por lo tanto, un valor de coeficiente de base asignado puede o no ser válido para un montaje dado. Los valores de coeficiente de base y de ensamblaje serán idénticos solo cuando la posición relativa de los componentes en el ensamblaje sea tal que los efectos de la interferencia aerodinámica se eliminen. Las Figuras 2 – 4, 2 – 7 y 2-8 ilustran arreglos de componentes libres de interferencia para tubos Pitot tipo "S" que tienen diámetros externos de tubo entre 0.48 y 0.95 cm (3/16 y 3/8 de pulgada). Los ensamblajes de tubo Pitot que no cumplan cualquiera o todas las especificaciones de las Figuras 2 – 4, 2,7, y 2-8, se deben calibrar de acuerdo a los procedimientos descritos en las secciones 10.1.2 a 10.1.5 a continuación, y antes de la calibración, se deben medir y registrar los valores de los espacios entre componentes (pitot-boquilla, pitot-termocupla, pitot-cubierta sonda).

NOTA: No use un tubo Pitot tipo "S" ensamblado, que esté construido de manera que el plano abierto de presión de impacto del tubo Pitot esté por debajo del plano de entrada de la boquilla (ver figura 2-6B)

10.1.2 Pasos de Calibración. Si se va a calibrar el tubo Pitot Tipo "S", una de las "patas" se debe marcar en forma permanente como A y la otra como B. La calibración se debe hacer en un sistema de flujo que tenga las siguientes características esenciales de diseño:

10.1.2.1 La corriente de flujo gaseoso debe ser confinada a un ducto de área transversal definida, sea circular o rectangular. Para áreas transversales circulares, el diámetro mínimo de ducto debe ser 30.48 cm (12 pulgadas); para áreas transversales rectangulares, el ancho (en el lado más corto) debe ser al menos 25.4 cm (10 pulgadas).

10.1.2.2 El área transversal del ducto de calibración debe ser constante en una distancia de 10 o más diámetros de ducto. Para un área transversal rectangular, úsese un diámetro equivalente, calculado de acuerdo con la ecuación 2-2 (ver sección 12.3), para determinar el número de diámetros de ducto. Para asegurar la presencia de patrones de flujo estable y totalmente desarrollado, o "sección de prueba", el lugar se debe localizar al menos ocho diámetros corriente abajo y dos diámetros corrientes arriba de las perturbaciones más cercanas.

NOTA: Los criterios de ocho y dos diámetros no son absolutos; se pueden usar otros lugares de sección de pruebas (sujetos a la aprobación de la Autoridad Ambiental), teniendo en cuenta que el flujo en el lugar de pruebas sea estable y demostrar que es paralelo al eje del ducto.

10.1.2.3 El sistema de flujo debe tener la capacidad para generar una velocidad en la sección de pruebas cercana a los 910 m/min. (3.000 ft/min). Esta velocidad debe ser constante en el tiempo para garantizar flujo estable durante la calibración. Nótese que los coeficientes obtenidos en el tubo Pitot tipo "S" mediante una calibración con velocidad individual de 910 m/min. (3.000 ft/min) generalmente serán válidos dentro de ± 3 por ciento de la medición de las velocidades por encima de 300 m/min (1.000 ft/min), o dentro de ± 6 por ciento de la medición de velocidades entre 180 y 30 m/min. (600 a 1.000 ft/min). Si se desea una correlación más precisa entre (C_p) y la velocidad, el sistema de flujo debe tener la capacidad de generar al menos cuatro velocidades distintas invariables en el tiempo en la sección de pruebas que cubran el rango de velocidad desde 180 a 1,500 m/min. (600 a 5.000 ft/min), y los datos de velocidad se deben tomar a intervalos de velocidad regulares sobre este rango (ver citas 9 y 14 en la sección 17.0 para más detalles).

10.1.2.4 Se deben cortar dos puertos de entrada, uno para cada uno de los tubos Pitot estándar y tubo pitot tipo "S", en la sección de pruebas; la entrada para el Pitot estándar se debe localizar ligeramente corriente abajo de la entrada para el tipo "S", de manera que las aperturas de impacto del estándar y el tipo "S" estén en el mismo plano transversal durante la calibración, es aconsejable que la sección de pruebas se construya en plexiglás o algún otro material transparente.

10.1.3 Procedimiento de Calibración. Nótese que este es un procedimiento general y no se debe usar sin primero consultar las consideraciones especiales que se presentan en la sección 10.1.5. También se hace la aclaración de que este procedimiento se aplica solo a calibración en velocidad individual. Para obtener los datos de calibración en los lados A y B del tubo Pitot tipo "S", proceda de la siguiente manera:

10.1.3.1 Asegurarse que el manómetro esté lleno y que el aceite esté libre de contaminación y, además, que sea de la densidad apropiada. Revise la posibilidad de fugas en todas las líneas Pitot, repárelas o cámbielas si es necesario.

10.1.3.2 Nivele el manómetro a cero. Prenda la hélice y espere hasta que el flujo se estabilice. Selle el puerto de entrada del tipo "S".

10.1.3.3 Asegúrese de que el manómetro esté nivelado y en cero. Ponga el tubo Pitot estándar en el sitio de calibración (determinado según se explica en la sección 10.1.5.1), y ponga en línea el tubo de manera que el extremo se ponga directamente en el flujo. Se debe tener un cuidado especial al alinear el tubo para evitar los ángulos de cabeceo y oscilación. Asegúrese de que el puerto de entrada alrededor del tubo esté sellado adecuadamente.

10.1.3.4 Lea el $\Delta p_{(std)}$ y registre su valor en una tabla de datos parecida a la que se muestra en la figura 2-9. Retire el tubo Pitot estándar del ducto y desconéctelo del manómetro. Selle el puerto de entrada estándar.

10.1.3.5 Conecte el tubo Pitot tipo "S" al manómetro. Abra el puerto de entrada para el tipo "S". Revise el nivel y el cero del manómetro. Inserte el tubo Pitot tipo "S" de manera que su apertura de impacto del lado A esté en el mismo punto donde estaba la del tubo Pitot estándar y se coloca directamente en el flujo. Asegúrese de que el puerto de entrada alrededor del tubo esté sellado adecuadamente.

10.1.3.6 Haga la lectura Δp_s y registre su valor en la tabla de datos. Retire el tubo Pitot tipo "S" del ducto y desconéctelo del manómetro.

10.1.3.7 Repita los pasos 10.1.3.3 a 10.1.3.6 hasta que haya obtenido tres pares de lecturas Δp para el lado A del tubo de Pitot Tipo S.

10.1.3.8 Repita los pasos 10.1.3.3 a 10.1.3.7 para el lado B del tubo Pitot tipo "S".

10.1.3.9 Realice los cálculos como se describe en la sección 12.4. Use el tubo pitot tipo “S” solo si los valores de δ_A y δ_B son menores o iguales a 0.01 y si el valor absoluto difiere entre $C_{p(A)}$ y $C_{p(B)}$ es 0,01 o menos.

10.1.4 Consideraciones Especiales

10.1.4.1 Selección del punto de calibración

10.1.4.1.1 Cuando se calibre un tubo Pitot tipo “S” aislado, seleccione un punto de calibración en, o cerca del centro del ducto y siga los procedimientos relacionados en las secciones 10.1.3. Los coeficientes calculados y obtenidos así para el tubo Pitot tipo “S”, (i.e., $C_{p(A)}$ y $C_{p(B)}$) serán válidos en tanto: (1) se use un tubo Pitot aislado; o (2) el tubo Pitot se usa con otros componentes (boquilla, termocupla, sonda de muestreo) en un ensamblaje libre de efectos de interferencia aerodinámica (ver figuras 2 – 4, 2-7, y 2 – 8).

10.1.4.1.2 Para las combinaciones tubo Pitot tipo “S” y termocupla (sin sonda de muestreo), seleccione un punto de calibración en o cerca del centro del ducto, y siga los procedimientos relacionados en las secciones 10.1.3. Los coeficientes obtenidos serán válidos en tanto se use la combinación tubo Pitot–termocupla por sí misma o con otros componentes en un montaje libre de interferencias (Figuras 2–4, 2-7, y 2–8).

10.1.4.1.3 Para montajes con sondas de muestreo, el punto de calibración debe localizarse en o cerca al centro del ducto; sin embargo, la inserción del revestimiento de la sonda en un ducto pequeño puede causar un bloqueo significativo del área transversal y producir valores de coeficiente incorrectos (cita 9 en la sección 17.0). Por lo tanto, para minimizar el efecto del bloqueo, el punto de calibración puede estar unas cuantas pulgadas fuera del centro si es necesario. El efecto del bloqueo será despreciable cuando el bloqueo teórico, determinado con un modelo proyectado del revestimiento de la sonda, sea 2 por ciento o menos del área transversal del ducto para ensamblajes sin revestimientos externos (Figura 2 – 10 a), y 3 por ciento o menos para montajes con revestimiento externo (Figura 2 – 10b).

10.1.4.2 Para los montajes de sonda en los que la interferencia tubo Pitot – boquilla es un factor (esto es, aquellos en los que la separación tubo Pitot – boquilla no cumple las especificaciones ilustradas en la Figura 2 – 7 a), el valor de $C_{p(s)}$ depende de la cantidad de espacio libre entre el tubo y la boquilla, y por lo tanto es función del tamaño de la boquilla. En estas circunstancias, se deben realizar calibraciones separadas con cada uno de los tamaños comúnmente usados de boquillas. Nótese que la técnica de calibración de velocidad individual es aceptable para este propósito, aún cuando los tamaños más grandes de boquilla ($> 0,635$ cm ó $\frac{1}{4}$ de pulgada) no se usa ordinariamente para muestreo isocinético a velocidades que estén cercanas a 910 m / min. (3.000 ft/min), la cual es la velocidad de calibración; nótese también que no es necesario lograr una muestra isocinética durante la calibración (ver cita 19 en la sección 17).

10.1.4.3 Para un montaje de sonda construido de manera que su tubo Pitot siempre se use en la misma orientación, solo se necesita calibrar un lado del tubo Pitot (el lado que tendrá contacto con el flujo). Aún así, el tubo Pitot debe cumplir las especificaciones de alineación de la Figura 2 – 2 o 2 – 3, en todo caso, debe tener una desviación promedio (σ) de 0,01 o menos (ver sección 10.1.4.4).

10.1.5 Uso en campo y recalibración

10.1.5.1 Uso en campo

10.1.5.1.1 Cuando se usa un tubo Pitot tipo “S” (tubo aislado o montaje) en el campo, se debe usar el valor adecuado del coeficiente para realizar los cálculos de velocidad). En tubos Pitot tipo “S” calibrados, el coeficiente del lado A se debe usar cuando el lado A esté de frente al flujo, y el coeficiente del lado B se debe usar cuando el lado B esté en el flujo; como alternativa, el promedio aritmético de los valores de los coeficientes A y B se puede usar sin restricción de cual lado esté en el flujo.

10.1.5.1.2 Cuando se use un montaje de sonda para muestrear un ducto pequeño, (12 a 36 pulgadas de diámetro), la punta de la sonda algunas veces bloquea una parte significativa de la sección transversal del ducto, causando una reducción en el valor efectivo de $C_p(s)$. Para más detalles consulte la cita 9 en la bibliografía. Los montajes convencionales de sonda de muestreo Pitot no se recomiendan para usar en ductos que tengan diámetros interiores menores de 30.5 cm (12 pulgadas) (cita 16 en la referencia).

10.1.5.2 Recalibración

10.1.5.2.1 Tubos Pitot aislados. Después de cada uso en campo, el tubo Pitot se debe examinar de nuevo con mucho cuidado en las vistas superior, lateral e inferior. Si las aperturas del Pitot todavía están alineadas dentro de las especificaciones ilustradas en la Figura 2-2 y 2-3, se puede asumir que el coeficiente de base del tubo Pitot no ha cambiado. Si, de todas formas, el tubo ha sido dañado de forma que no cumpla más las especificaciones de las Figuras 2-2 y 2-3, se debe reparar el daño o restaurar la alineación adecuada de las aperturas del tubo o se debe descartar.

10.1.5.2.2 Montajes de Tubo Pitot. Después de cada uso en campo, revise el alineamiento de las aperturas del tubo Pitot, como en la sección 4.1.6.2.1; mida otra vez los espacios inter - componentes del montaje. Si los espacios inter - componentes no han cambiado y el alineamiento de las aperturas es aceptable, se puede asumir que el coeficiente del montaje no ha cambiado. Si la alineación no es muy grande dentro de las especificaciones de las Figuras 2-2 y 2-3, habrá que reparar o cambiar el tubo Pitot (y calibrar el montaje nuevo si es necesario). Si los espacios inter - componentes han cambiado, trate de poner los espacios correctos o calibre otra vez el montaje.

10.2 Tubo Pitot estándar (si aplica). Si se usa un tubo Pitot estándar para el traveso de velocidad, el tubo debe estar construido de acuerdo con los criterios de la sección 2.7 y se le debe asignar un valor de coeficiente base de 0.99. Si el tubo Pitot estándar se usa como parte de un montaje, el tubo debe estar de modo que no haya interferencias (sujeto a la aprobación de la Autoridad ambiental).

10.3 Medidores de Temperatura.

10.3.1 Después de cada uso calibre los termómetros de dial, los de bulbo llenos de líquido, los sistemas termocupla - potenciómetro, y otros medidores a una temperatura dentro del 10 por ciento de la temperatura absoluta promedio. Para temperaturas hasta 405°C (761°F), use un termómetro de referencia ASTM de mercurio en vidrio, o su equivalente; en forma alternativa, se pueden usar termocupla y potenciómetro de referencia (calibrados por medio de NBS) o puntos termométricos fijos, por ejemplo baño de hielo y agua hirviendo (corregida por presión barométrica). Para temperaturas por encima de 405°C (761 °F), use un sistema potenciómetro - termocupla de referencia calibrado por medio de NBS o una referencia alterna, sujeto a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

10.3.2 Validez de los datos de temperatura registrados en el campo. Si, durante la calibración, las temperaturas absolutas medidas con el medidor que está calibrando y las del medidor de referencia concuerdan hasta 1,5 por ciento, los datos de temperatura tomados en campo se deben considerar válidos. De lo contrario, la prueba de emisiones contaminantes se debe considerar invalidadas, o se deben hacer ajustes a la prueba (si se considera adecuado), sujetos a la aprobación de la Autoridad Ambiental.

10.4 Barómetro. Calibre el barómetro que use contra un barómetro de mercurio.

11. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

La toma de muestras y análisis son concurrentes para este método (ver sección 8.0)

12. ANÁLISIS DE DATOS Y CÁLCULOS.

Realice los cálculos, dejando por lo menos un decimal extra sobre los datos obtenidos. Redondee los resultados después de los cálculos finales.

12.1 NOMENCLATURA

A =	Área transversal de la chimenea m ² (ft ²)
Bws =	Vapor de agua en la corriente gaseosa (a partir del Método 5 o referencia del Método 4), proporción en volumen
C_p =	Coefficiente del tubo Pitot, adimensional
C_{p(s)} =	Coefficiente del tubo Pitot tipo S, adimensional
C_{p(std)} =	Coefficiente del tubo Pitot Estándar; use 0.99 si el coeficiente es desconocido y el tubo está diseñado de acuerdo a los criterios de las secciones 6.7.1 a 6.7.5 de este método.
D_e =	Diámetro equivalente
K =	0.127 mmH ₂ O (en el sistema métrico). 0.005 pulg. H ₂ O. en el sistema inglés
K_p =	Constante de la ecuación de velocidad.
L =	Longitud.
M_d =	Peso molecular del gas en chimenea, base seca (ver sección 8.6), g/g-mole (lb/lb-mole).
M_s =	Peso molecular del gas en chimenea, base húmeda g/g-mole (lb/lb-mol).
n =	Número total de puntos de recorrido.
P_{bar} =	Presión barométrica en el sitio de medición, mm Hg (pulg. Hg).
P_g =	Presión estática de chimenea, mm Hg (pulg Hg).
P_s =	Presión absoluta de chimenea, mm Hg (P _{bar} + P _g) mm Hg (pulg Hg).
P_{std} =	Presión absoluta estándar, 760 mm Hg (29,92 pulg Hg).
Q_{sd} =	Tasa de flujo volumétrico de gas seco en chimenea corregida a las condiciones estándar, dscm / hr (dscf / hr).
T =	Factor de sensibilidad para indicadores de presión diferencial.
T_s =	Temperatura de chimenea, °C, °F.
T_{s(abs)} =	Temperatura absoluta de chimenea °K, (°R) = 273 + T _s en el sistema métrico. = 460 + T _s en el sistema inglés.
T_{std} =	Temperatura absoluta estándar, 293°K (528°R).
V_s =	Velocidad promedio del gas en chimenea, m/seg. (ft/seg).
W =	Ancho.
Δp =	Cabeza de velocidad del gas en chimenea, mm H ₂ O (pulg H ₂ O).
Δp =	Lecturas de cabeza individual del punto recorrido "i", mm (pulg) H ₂ O.
Δp_(std) =	Cabeza de velocidad medida en el tubo Pitot estándar, cm (pulg) H ₂ O.
Δp_(s) =	Cabeza de velocidad medida en el tubo Pitot tipo "S", cm (pulg) H ₂ O.
3600 =	Factor de conversión seg/hr
18,0 =	Peso molecular del agua g/g-mole (lb/lb-mole)

12.2 Calcular T de la siguiente manera

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta p_i + K}}{\sum_{i=1}^n \Delta p_i} \quad \text{Eq. 2.1}$$

12.3 Calcular De de la siguiente manera

$$D_e = \frac{2 * LW}{L + W} \quad \text{Eq. 2.2}$$

12.4 Calibración del tubo Pitot tipo

12.4.1 Para cada uno de los seis pares de lecturas de Δp (es decir, tres de un lado A y tres de un lado B) obtenida en la sección 10.1.3, calcule el valor del coeficiente de tubo pitot tipo S de acuerdo con la ecuación 2-3:

$$C_{p(s)} = C_{p(std)} \sqrt{\frac{\Delta p_{std}}{\Delta p}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

12.4.2 Calcular $C_{p(A)}$, la media del coeficiente del lado A y $C_{p(B)}$, la media del coeficiente del lado B. Calcular la diferencia entre estos dos valores promedio.

12.4.3 Calcular la desviación de cada uno de los tres valores lado A de $C_{p(s)}$ de $C_{p(A)}$, y la desviación de cada uno de los tres valores lado B de $C_{p(s)}$ de $C_{p(B)}$, utilizando la ecuación 2 - 4:

$$\text{Desviación} = C_{P(S)} - \bar{C}_{P(AoB)} \quad \text{Eq. 2.4}$$

12.4.4 Calcular la desviación promedio de la media σ , tanto para los lados A y B del tubo de Pitot. Utilizar la ecuación 2-5:

$$\sigma_{AoB} = \frac{\sum_{I=1}^3 |C_{P(S)} - C_{P(AOB)}|}{3} \quad \text{Eq. 2.5}$$

12.5 Peso molecular del gas en chimenea

$$M_s = M_d (1 - B_{ws}) + 18.0 B_{ws} \quad \text{Eq. 2 -6}$$

12.6 Promedio de velocidad del gas en chimenea

$$V_s = K_p C_p \sqrt{\Delta P_{avg}} \sqrt{\frac{T_{s(abs)}}{P_s M_s}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$34.97 \frac{m}{seg} \left[\frac{\left(\frac{g}{g} \cdot mole \right) (mmHg)}{(\text{°K})(mmH_2O)} \right]^{1/2} \quad \text{Métrico}$$

$$85.49 \frac{ft}{seg} \left[\frac{\left(\frac{lb}{lb} \cdot mole \right) (in.Hg)}{(\text{°R})(inH_2O)} \right]^{1/2} \quad \text{Ingles}$$

12.7 Promedio de la tasa de flujo volumétrico de gas seco en chimenea

$$Q = 3600(1 - B_{ws}) V_s A \left| \frac{T_{std} P_s}{T_{s(abs)} P_{std}} \right| \quad \text{Eq. 2.8}$$

13. MÉTODO DE EJECUCIÓN.

14. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN [RESERVADO]

15. MANEJO DE RESIDUOS [RESERVADO]

16. REFERENCIAS

1. Mark, L. S. Manual del Ingeniero Mecánico, Nueva York, McGraw Hill Books Co., Inc, 1951.
2. Perry, J. H. Manual del Ingeniero Químico, Nueva York, McGraw Hill Books Co. Inc., 1960.
3. Shiguehara, R. T.; W. F. Todd y W. S. Smith. Importancia de los Errores en las Mediciones de Muestras en Bloque. Agencia de Protección Ambiental de los E. U., Parque Research Triangle, NC (Presentado en la Reunión Anual de la Asociación para el Control de la Polución del Aire, San Luis , Missouri, 14 de Junio de 1970).
4. Método Estándar para Muestras de Materiales en Partículas. En : Libro de Normas ASTM 1971, Parte 23. Filadelfia, Pasadena, 1971. Diseño ASTM D – 2928 – 71.
5. Vennard, J. K. Mecánica Elemental de Fluidos. Nueva York. John Wiley and Sons Inc., 1947.
6. Medición de Fluidos – Teoría y Aplicación. Sociedad Norteamericana de Ingenieros Mecánicos, Nueva York, NY; 1959.
7. Manual ASHRAE de Fundamentos, 1972. P. 208.

8. Libro Anual de Normas ASTM, parte 26, 1974. P. 648.
9. Vollaro, R. F. Guías para la Calibración del Tubo Pitot tipo "S". Agencia de Protección Ambiental de los E. U. Parque Research Triangle, NC (Presentado en la Primera Reunión Anual, Sociedad de Evaluación de Fuentes, Dayton, Ohio, 18 de Septiembre de 1975).
10. Vollaro, R. F. Estudio sobre la Calibración del Tubo Pitot tipo "S" . Agencia de Protección Ambiental de los E. U., División de Medición de Emisiones, Parque Research Triangle, NC, Julio de 1974.
11. Vollaro, R. F. Efecto de la des-alineación de la Apertura de Impacto sobre el Valor del Coeficiente del Tubo Pitot tipo "S". Agencia de Protección Ambiental de los E. U. División de Medición de Emisiones. Parque Research Triangle. NC; Octubre de 1976.
12. Vollaro, R. F. Establecimiento de un Valor de Coeficiente de Base para los Tubos Pitot tipo "S"
13. construidos adecuadamente. Agencia de Protección Ambiental de los E. U. División de Medición de Emisiones. Parque Research Triangle. NC, Noviembre de 1976.
14. Vollaro, R. F. Evaluación de la Técnica de Calibración por la Velocidad Individual como Medio para Determinar el Coeficiente de los Tubos Pitot tipo "S". Agencia de Protección Ambiental de los E. U. División de Medición de Emisiones. Parque Research Triangle. NC, Agosto de 1975.
15. Vollaro, R. F. Uso de los Tubos Pitot Tipo "S" Para la medición de Velocidades Bajas. Agencia de Protección Ambiental de los E. U. División de Medición de Emisiones. Parque Research Triangle. NC; Noviembre de 1976.
16. Smith, Marvin L. Calibración de Velocidad de la Sonda de Muestreo Tipo EPA. United Technologies Corporation. Division De Aeronaves de Pratt y Whitney, East Hartford, CN, 1975.
17. Vollaro, R. F. Procedimiento Recomendado para Muestreos Traversos en Ductos menores de 12 Pulgadas de Diámetro. Agencia de Protección Ambiental de los E. U. División de Medición de Emisiones. Parque Research Triangle. NC, Noviembre de 1976.
18. Ower, E. Y R. C. Pankhurst. Medición del Flujo de Aire, 4ª edición, Londres, Pergamon Press, 1966.
19. Vollaro R. F. Encuesta sobre los Instrumentos Disponibles Comercialmente para la Medición de Velocidades Gaseosas de Rango Bajo. Agencia de Protección Ambiental de los E. U. División de Medición de Emisiones. Parque Research Triangle. NC, Noviembre de 1976. (Artículo no publicado).
20. Gnyp, A. W., C. C. Saint Pierre, D. S. Smith, D. Mozzon, y J. Steiner. Investigación Experimental del Efecto de las Configuraciones Tubo Pitot – Sonda de Muestreo sobre la Magnitud del Coeficiente del Tubo Pitot Tipo "S" para las Sondas de Muestreo Disponibles Comercialmente. Preparado por la Universidad de Windsor para el Ministerio del Medio Ambiente, Toronto, Canadá. Febrero de 1975.

17. TABLAS, DIAGRAMAS, CARTAS DE FLUJO, Y VALIDACIÓN DE DATOS.

Figura 2.1 Ensamble del manómetro al tubo Pitot tipo S

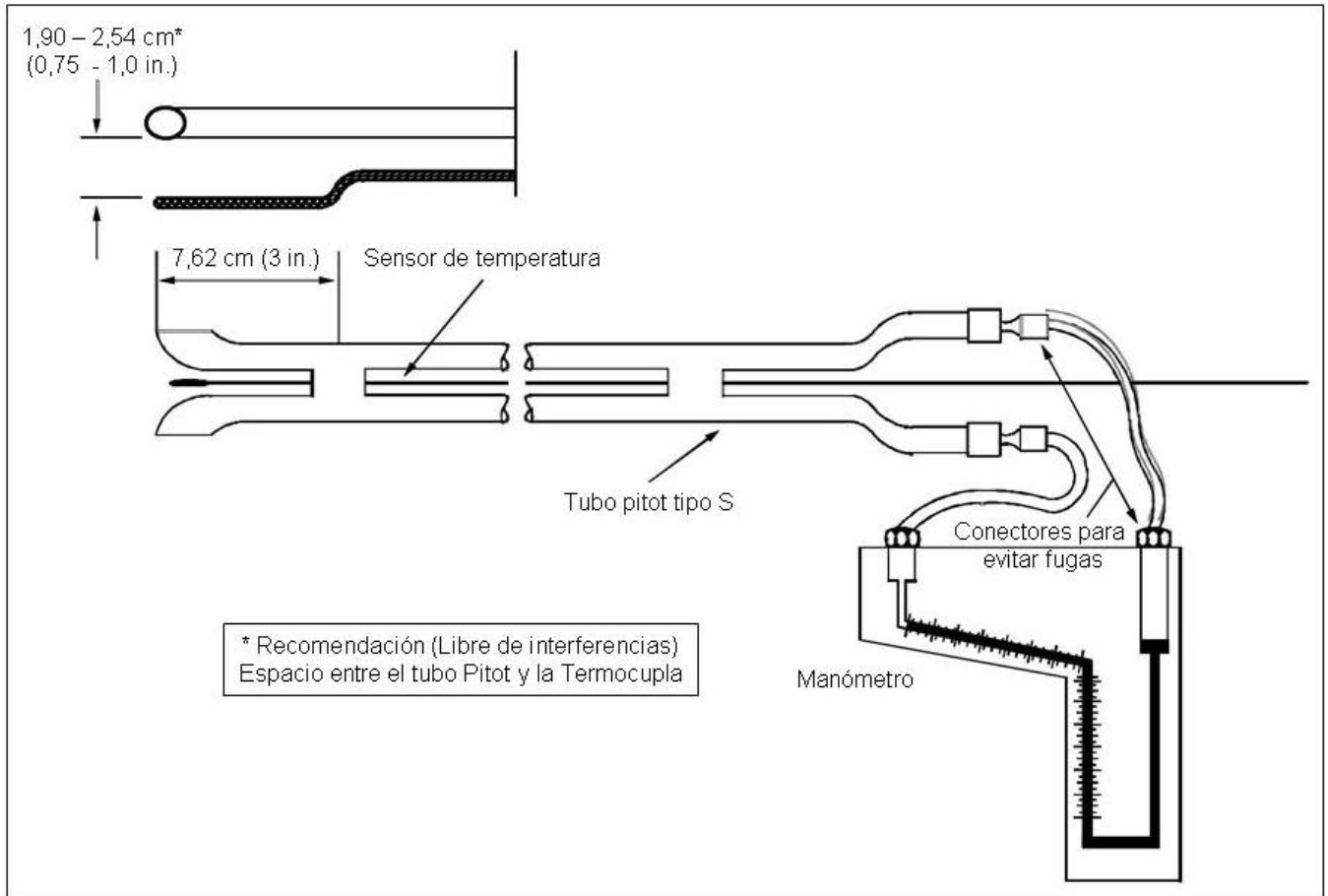


Figura 2-2 Construcción propia del tubo Tipot tipo S

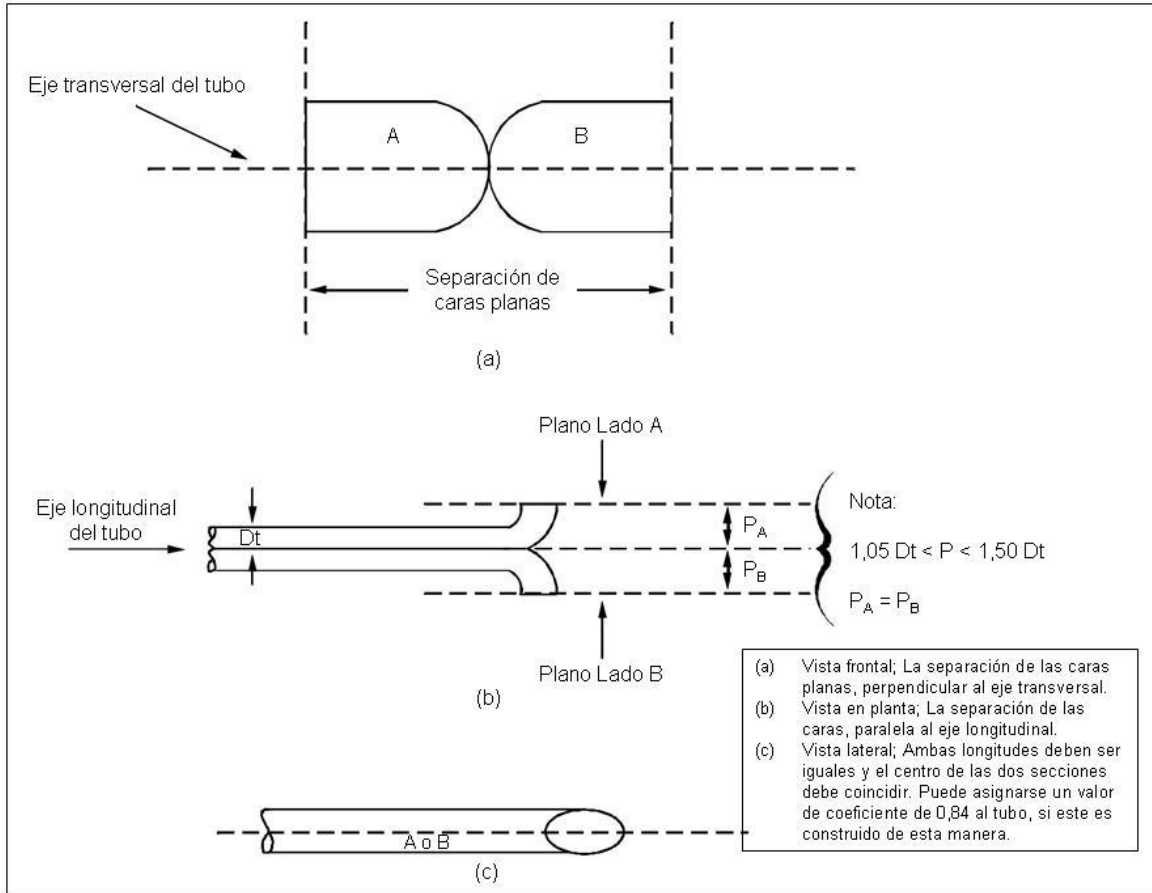
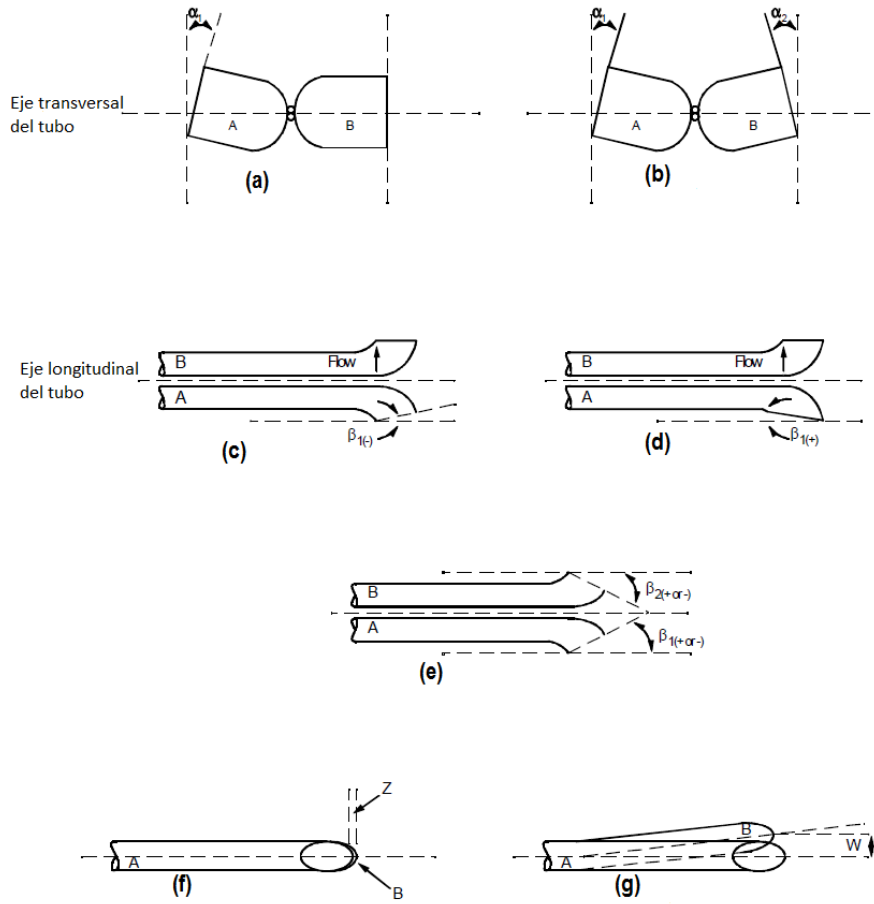


Figura 2-3. Los tipos de desajustes de apertura para el rostro-que puede resultar de uso en el campo o la construcción inadecuada de tubos de Pitot tipo S.



Los tipos de desalineación de apertura de cara mostrada anteriormente no afectará el valor de referencia de C_p , siempre y cuando α_1 y $\alpha_2 \leq 10^\circ$, β_1 y $\beta_2 \leq 5^\circ$, $z \leq 0.32 \text{ cm}$ (1/8 in.), y $w \leq 0.08$ (1/32 in.) (Referencia 11.0 en la sección 16.0)

Figura 2-4. Temperatura correcta colocación del sensor para evitar interferencias; D_t entre 0,48 y 0,95 cm (3 / 16 y 3 / 8 in).

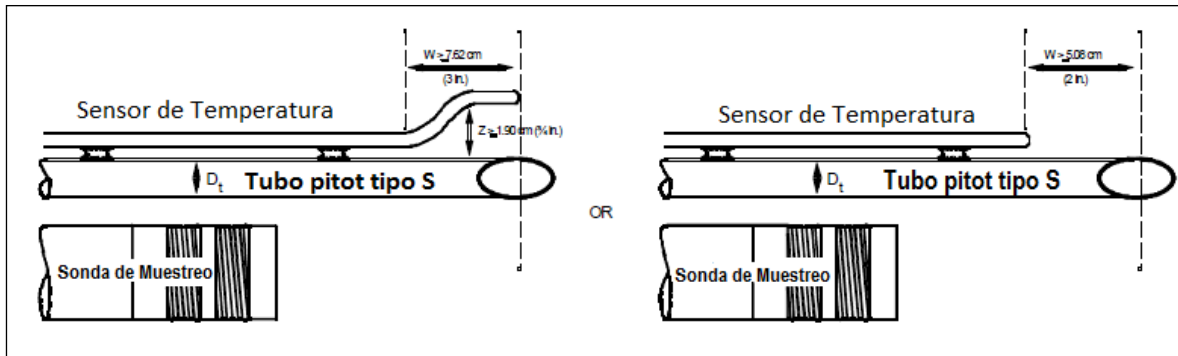


Figura 2-5. Estándar del tubo de Pitot tubo de especificaciones de diseño.

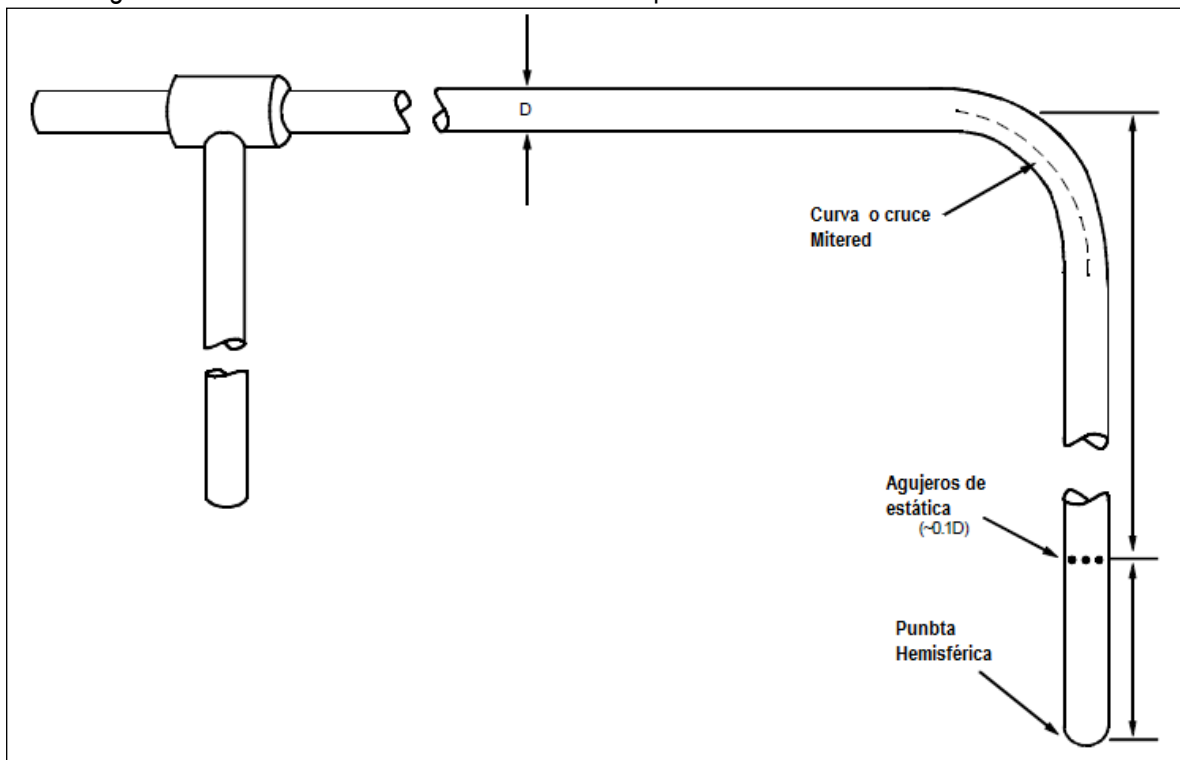


Figura 2.6. Formato para los datos de velocidad.

PLANTA _____		<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div> <p>SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CHIMENEA</p>		
FECHA _____ REVISIÓN No. _____				
DIÁMETRO O DIMENS. DE LA CHIMENEA (m)/(in). _____				
PRESIÓN BAROMÉTRICA mm Hg (in Hg) _____				
ÁREA TRANSVERSAL m ² (ft ²) _____				
OPERARIOS _____				
No. TUBO PITOT _____				
COEFICIENTE, Cp _____				
DATO ANTERIOR CALIBRADO _____				
ESQUEMA DE LA CHIMENEA _____				

PUNTO No.	VELOCIDAD Δp mm (in.) H ₂ O	TEMPERATURA DE LA CHIMENEA		Pg mm Hg (in. Hg)	$(\Delta p)^{1/2}$
		Ts, °C (°F)	Ts, °K (°R)		
		PROMEDIO			

Figura 2-7. Configuración boquilla de muestreo – tubo pitot

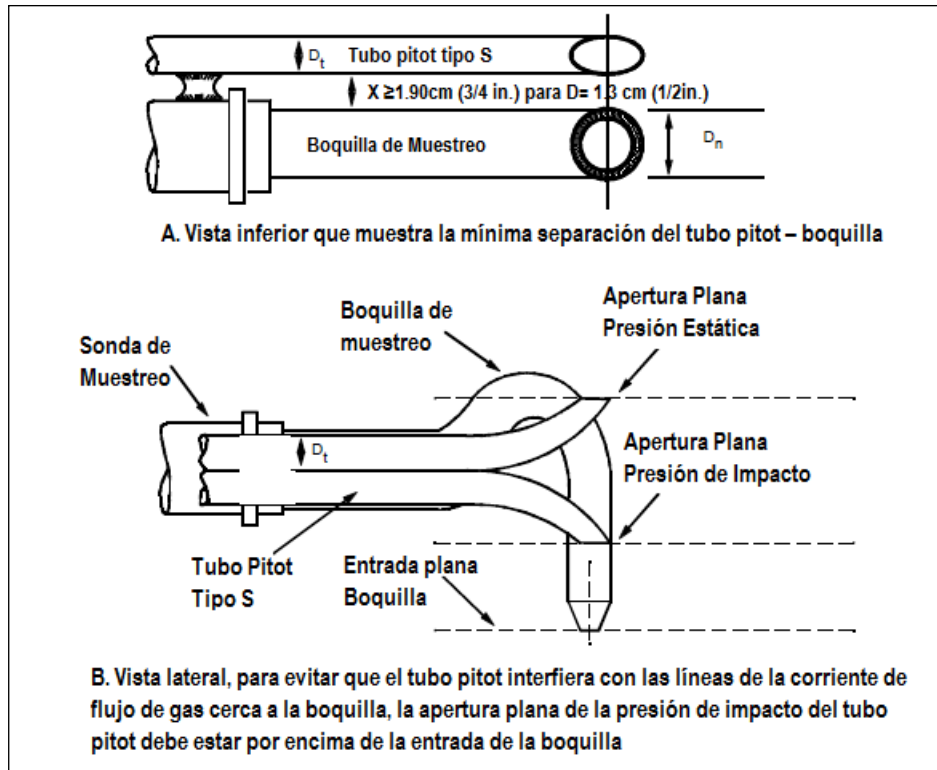


Figura 2-8. Mínima separación de la sonda de muestreo – Pitot necesario para prevenir interferencias; D_t entre 0.48 y 0.65 cm (3/16 y 3/8 de pulgada)

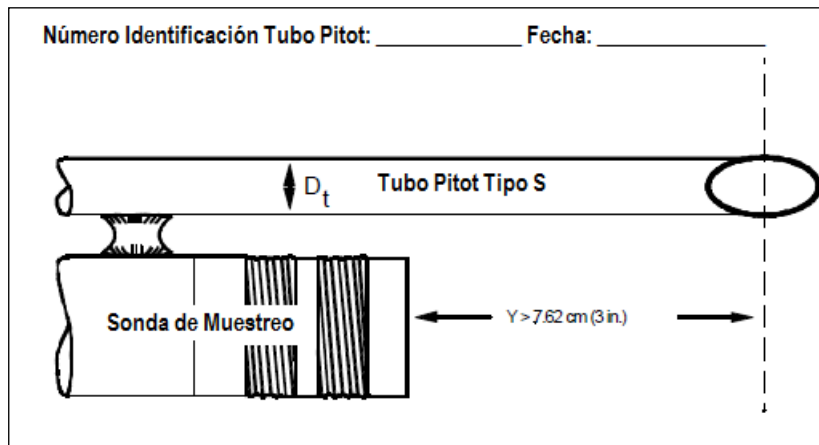


Figura 2.9. Formato para la calibración del tubo pitot.

CALIBRACIÓN LADO "A"				
CORRIDA	$\Delta P_{\text{estandar}}$ cm H ₂ O (in H ₂ O)	$\Delta P_{(S)}$ cm H ₂ O (in H ₂ O)	$C_{P(S)}$	DESVIACIÓN $C_{P(S)} - C_{P(A)}$
1				
2				
3				
		C_P Promedio LADO "A"		

CALIBRACIÓN LADO "B"				
CORRIDA	$\Delta P_{\text{estandar}}$ cm H ₂ O (in H ₂ O)	$\Delta P_{(S)}$ cm H ₂ O (in H ₂ O)	$C_{P(S)}$	DESVIACIÓN $C_{P(S)} - C_{P(B)}$
1				
2				
3				
		C_P Promedio LADO "B"		

$$\sigma_{A \text{ o } B} = \frac{\sum_{i=1}^3 |C_{P(S)} - \bar{C}_{P(A \text{ o } B)}|}{3}$$

Figura 2-10. Modelos de área proyectada para ensambles típicos de tubo pitot

