

NTP 668: Medición del caudal en sistemas de extracción localizada



Mesurement du flux de l'air dans des systèmes d'extraction locale
Air flow measurement in local exhaust systems

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactora:

Nuria Cavallé Oller
Ingeniero Químico

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

El caudal que circula por un sistema es la magnitud clave para conocer si está funcionando correctamente. El caudal se puede calcular conociendo la velocidad media del fluido y la sección del conducto. En esta Nota Técnica de Prevención se describe cómo medir la velocidad del aire en un conducto, con qué instrumentos y los puntos en que es conveniente medir.

Introducción

En la Nota Técnica de Prevención 615, se describió la utilidad de las medidas de presión estática en un sistema de extracción localizada para el control rutinario de su funcionamiento. Dicho método, interesante por su sencillez y rapidez, proporciona además una estimación aproximada del caudal circulante midiendo en la garganta de la campana. Sin embargo, en determinadas ocasiones, como a la puesta en marcha por primera vez de una instalación, se requiere conocer con más exactitud el valor del caudal, por lo que el método de la medida de la presión estática no resulta adecuado.

En la mencionada NTP-615 se muestra un cuadro comparativo entre los 3 métodos de determinación del caudal (medida de la presión estática, medida de la presión dinámica y lectura directa con instrumentación específica) describiendo sus condiciones de aplicabilidad, así como las ventajas e inconvenientes de cada método. Aunque existe instrumentación específica para la medida del caudal de gases en conductos, en los sistemas de extracción localizada se suele recurrir a la medida de la velocidad media del fluido y a la medida ϕ a la sección del conducto en ese punto (dato conocido por diseño o fácilmente medible si no es posible acceder al dato teórico). El caudal que circula por el sistema no es más que el producto de ambas magnitudes.

La medición de la velocidad en un sistema exige una serie de condiciones del punto de medida que es necesario describir detalladamente (que sea accesible, en un tramo de conducto recto, sin turbulencias, etc); en caso contrario, se obtendrían resultados erróneos. Las medidas pueden llevarse a cabo de dos formas diferenciadas en cuanto a los instrumentos utilizados, aunque similares en cuanto a su fundamento teórico: con un tubo de Pitot o bien con equipos de medida directa de la velocidad.

Perfiles de velocidad de los gases en conductos. Elección de los puntos de medida

Un gas puede presentar dos tipos de régimen cuando circula por un conducto, determinados por el valor del número de Reynolds, que se define como:

$$Re = \rho v D / \mu$$

donde:

Re: número de Reynolds en el diámetro de conducto

ρ : densidad del fluido, kg /m³

v: velocidad media del fluido en el diámetro de conducto, m/s

D: diámetro de la tubería ⁽¹⁾,

μ : viscosidad del fluido, kg/m-s

Para valores de Re inferiores a 2000, el régimen de flujo es laminar, mientras que para valores superiores a 4000 es turbulento, existiendo una zona intermedia. En los sistemas de extracción localizada el régimen de trabajo es turbulento incluso a velocidades muy bajas.

El régimen turbulento muestra una mayor homogeneidad de velocidades a lo largo de la sección de un conducto (figura 1), por lo que el error que se comete al tomar la velocidad en un solo punto como la velocidad media del fluido es menor que el error que se produciría en régimen laminar.

Figura 1

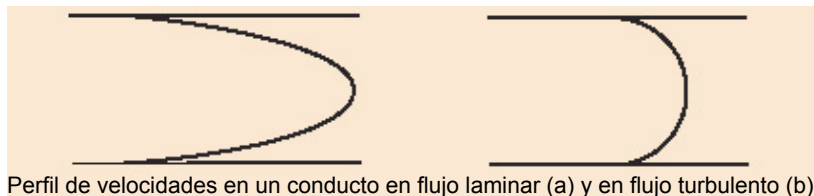
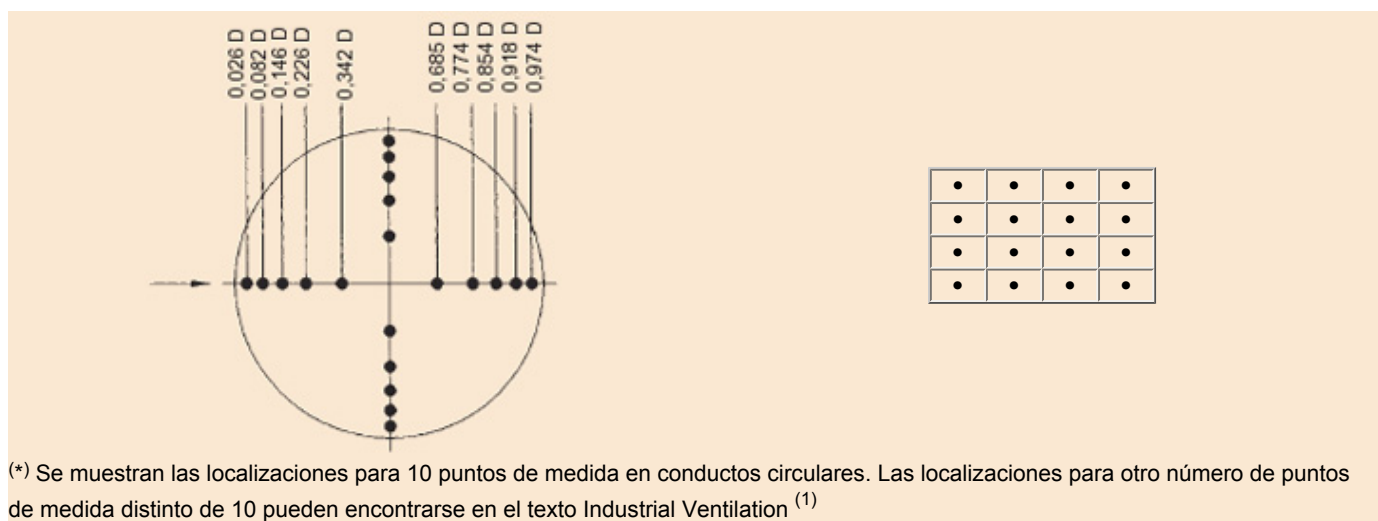


Figura 2

Puntos de medida de la velocidad en conductos circulares y rectangulares



(*) Se muestran las localizaciones para 10 puntos de medida en conductos circulares. Las localizaciones para otro número de puntos de medida distinto de 10 pueden encontrarse en el texto Industrial Ventilation ⁽¹⁾

Otro aspecto a tener en cuenta es que los perfiles de velocidad se ven deformados por la existencia de elementos que modifiquen la sección y la dirección del flujo, como por ejemplo codos, uniones, válvulas, etc. Por ello, e independientemente del tipo de régimen, es importante que el punto de medida se seleccione a una distancia suficiente de cualquier perturbación. La recomendación general es medir, como mínimo, a una distancia entre 7 y 10 diámetros de conducto aguas abajo del punto crítico y a unos 4 diámetros aguas arriba, así como realizar varias mediciones en la misma sección de conducto para obtener la velocidad media. En la figura 2 se muestra el número de puntos de medida y su distribución según el conducto sea circular o rectangular.

Para los conductos circulares se aconseja un número de medidas entre 6 y 20 en dos diámetros perpendiculares dependiendo del tamaño del conducto y de la exactitud requerida (para conductos de diámetro inferior a 15 cm son suficientes 6 lecturas). Los puntos de medida corresponden a coronas circulares de igual área dentro de la sección recta.

En conductos rectangulares se divide la sección en rectángulos de igual área y se mide la velocidad en el centro de cada uno de ellos. La distancia entre puntos debe ser como máximo de 15 cm.

En el caso de no requerir una elevada exactitud de la velocidad media en conducto, es decir, cuando se trate de una comprobación rutinaria, y teniendo en cuenta que el régimen es turbulento, puede utilizarse la siguiente aproximación a partir de una sola medida en el centro del conducto:

$$v = 0.85 \cdot v_{\text{centro}}$$

Medición de la presión dinámica mediante un tubo de Pitot

Se hace especial referencia al tubo de Pitot puesto que es el antecesor de los instrumentos de medida directa y continua siendo ampliamente utilizado por su aplicabilidad y robustez.

Descripción del instrumento

Este instrumento (figura 3) consiste en dos tubos concéntricos muy delgados, de diámetro entre 2.5 mm y 10 mm y normalmente de

acero inoxidable, aunque puede

ser de otros materiales. Uno de los tubos mide la presión total de la corriente de aire en la que es insertado y el otro mide únicamente la presión estática, mediante conexión a sendos manómetros con una de las ramas abierta a la atmósfera.

Si se conecta un manómetro con una rama en cada salida de ambos tubos la lectura muestra directamente la diferencia entre ambas presiones, que no es más que la presión dinámica, según la ecuación general:

$$P_D = P_T - P_E \quad [\text{Ec. 1}]$$

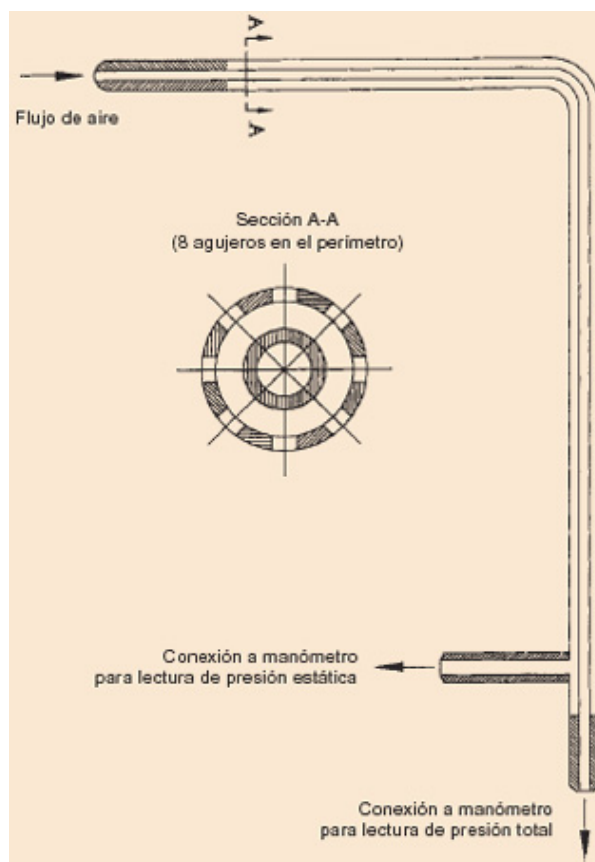
donde:

P_D : presión dinámica, en milímetros de columna de agua (mm cda)

P_E : presión estática, mm cda

P_T : presión total, mm cda

Figura 3
Tubo de Pitot



La presión dinámica se relaciona con la velocidad del fluido según la ecuación:

$$v = 4.43 \left(\frac{P_D}{d} \right)^{1/2} \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde:

v : velocidad del fluido, m/s

P_D : presión dinámica en el conducto, mm cda

d : densidad del fluido, kg /m³

Si el fluido es aire en condiciones estándar (20 °C y 1 atm), la densidad del aire es 1.2 kg /m³. Entonces la ecuación anterior puede expresarse como:

$$v = 4.04 (P_D)^{1/2} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Procedimiento de medida

En la Figura 4 se muestra la colocación del tubo de Pitot en el conducto antes del ventilador. Como puede observarse la rama que mide la presión total debe estar encarada a la dirección del flujo y los orificios de la rama que mide presión estática son perpendiculares a la dirección del flujo. Para conductos de diámetro inferior a 30 cm es aconsejable el uso de un tubo de Pitot de diámetros inferior al standard.

Cálculo de la velocidad a partir de los valores de P_D Se calcula la velocidad para cada medida puntual de P_D según la ecuación [2] (o la ecuación [3] si se trabaja en condiciones estándar) y se promedian los valores obtenidos ⁽²⁾. Si las condiciones de trabajo se apartan de las estándar deben aplicarse las correcciones pertinentes según lo expuesto en el apartado 4 de esta NTP

Tubos de Pitot modificados

Cuando se trabaja en atmósferas con un alto contenido en partículas no es adecuado el uso de tubos de Pitot convencionales por el riesgo de obturación que presentan. Dos modificaciones de los tubos de Pitot de más uso son los Tipo-S (Staubscheid) y los Tipo-L. Estos tubos resuelven en gran medida el problema de las partículas en suspensión en el fluido aunque presentan el inconveniente de tener que calibrarse para las condiciones específicas de operación en las que van a ser utilizados.

El tubo de Pitot multi-punto contiene tres o más aberturas en un tubo situadas en el centro de circunferencias de igual área inscritas en la sección transversal del conducto. Las aberturas enfrentadas a la dirección del caudal miden la presión total, mientras que las no enfrentadas miden la presión estática. Un tabique en el centro del tubo separa unas y otras aberturas. Estos tubos deben construirse especialmente para cada instalación puesto que las posiciones de los orificios son función del diámetro del conducto. Poseen la ventaja de proporcionar directamente más de una lectura por sección transversal, y por lo tanto evita tener que colocar el tubo de Pitot convencional en distintos puntos del conducto, operación que puede resultar algo tediosa.

Instrumentos de medición de la velocidad

Existe gran variedad de instrumentos (denominados anemómetros o velómetros) para medir directamente la velocidad del aire en un sistema de extracción localizada. Aquí realizaremos una breve descripción de los tipos principales, centrándonos en su rango de aplicabilidad, los accesorios que pueden tener implementados así como las ventajas e inconvenientes de cada uno de los tipos.

Termoanemómetros

El fundamento de un termoanemómetro (figura 5) consiste en medir el enfriamiento de un componente metálico caliente (alambre o bola) por efecto de la corriente de aire que circula a través del conducto. Hay dos tipos de sensores de flujo másico de convección térmica: los que operan a potencia constante, y los que lo hacen a temperatura constante.

Figura 4
Colocación del tubo de Pitot dentro del conducto y conexiones de manómetros

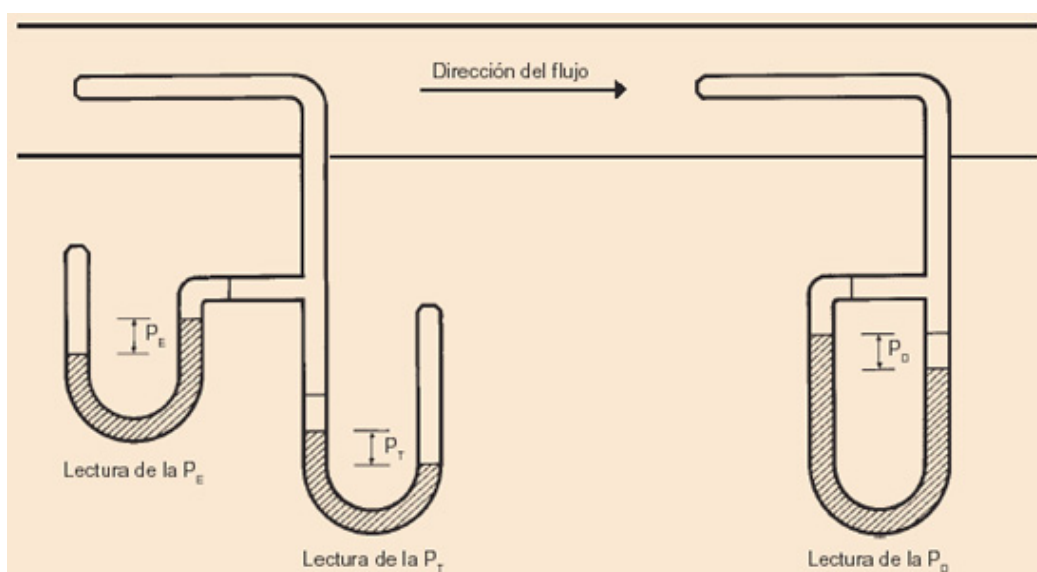
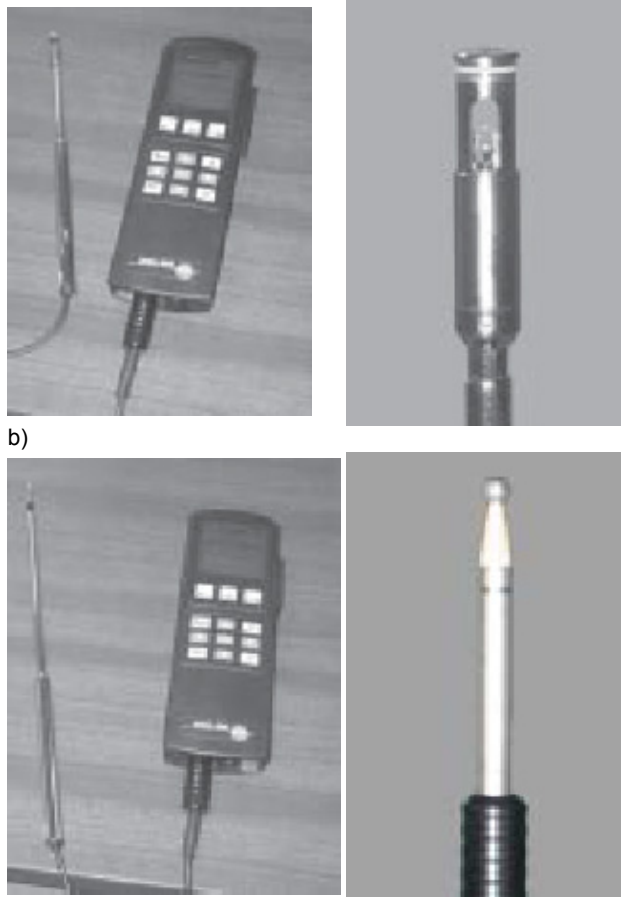


Figura 5
Termoanemómetro de hilo caliente (a) y termoanemómetro de bola (b) con detalle de sus sondas respectivas

a)



Los primeros están integrados por dos sensores másicos de caudal de convección térmica; uno de ellos está caliente y el otro a temperatura ambiente. La diferencia de temperatura (medida como voltaje o intensidad de corriente) es una magnitud directamente proporcional a la velocidad (y caudal) del fluido.

Los sensores que operan a temperatura constante disponen además de un regulador que mantiene la temperatura. En este caso se mide la corriente requerida para mantener esta temperatura, siendo también proporcional a la velocidad del fluido.

La mayoría de los termoanemómetros usan el primer sistema porque muestra tiempos de respuesta menores (alrededor de 5 segundos), tienen una línea de base más estable y un rango de temperaturas de trabajo más amplio.

En cuanto a la posición dentro del conducto es importante evitar las turbulencias, que pueden rendir resultados por exceso. Algunos fabricantes aconsejan medir a una distancia mínima de 10 diámetros aguas abajo y 4 diámetros aguas arriba de cualquier punto crítico.

Velómetros de álabes rotativos

Los velómetros de álabes rotativos (figura 6) están basados en la medición de las revoluciones por minuto del molinete, siendo este valor proporcional a la velocidad del fluido que circula por el conducto. La señal puede medirse con un reloj (velómetros mecánicos) o bien translucirse a una señal eléctrica. En este caso deben utilizarse instrumentos intrínsecamente seguros cuando las mediciones se realizan en atmósferas inflamables. Existen velómetros de distintos diámetros. Es obvio que los de mayor tamaño no son adecuados para mediciones dentro de los conductos ya que requerirían orificios demasiados grandes. En este caso, su utilidad se pone de manifiesto para medidas en boca de campana o a la descarga del sistema.

En general, las sondas de molinete pierden precisión por debajo de 0,25 m/s, lo que no significa un problema para su uso en mediciones en sistemas de extracción localizada pero sí para mediciones ambientales.

Figura 6
Anemómetro de molinete de 100 mm de diámetro



Sensores acústicos

Estos sensores miden el tiempo que tarda un pulso de sonido en viajar en la dirección del flujo y lo comparan con el tiempo que tarda el mismo pulso de sonido en la dirección inversa. Para estas mediciones es necesario instalar los dos sensores en distintas partes del conducto. Se trata de un método no intrusivo, con componentes fácilmente accesibles y precisión estable en un amplio intervalo de caudales.

Calibración de los instrumentos

El manual de instrucciones de los instrumentos indica sus especificaciones acerca del rango de linealidad, exactitud, precisión, etc. Estas magnitudes han sido determinadas mediante pruebas estandarizadas para cada tipo de instrumento.

Es de gran importancia prever un programa de mantenimiento y calibración. El mismo manual indica normalmente la frecuencia recomendada para asegurar que las especificaciones se mantienen y el instrumento proporciona lecturas correctas. Es habitual que el propio suministrador ofrezca dicho servicio. También existen en el mercado túneles de viento de dimensiones reducidas que permiten al usuario calibrar sus propios instrumentos.

Mediciones asociadas: temperatura, presión atmosférica y humedad

Si las condiciones ambientales de medida del caudal de aire se alejan de las condiciones estándar (temperatura = 20 °C y presión barométrica = 1 atm) no puede asumirse que su densidad sea 1.2 kg/m³ y deben realizarse las correcciones pertinentes.

Se considera que la desviación merece ser tenida en cuenta cuando existe una diferencia de temperatura de 15 °C o más y cuando la zona geográfica donde se hace la medida tiene una altitud superior a 300 m respecto al nivel del mar. También deberá realizarse una corrección cuando la humedad del fluido es superior a 0.02 kg de vapor de agua/kg de aire seco.

La medición de la presión atmosférica, la temperatura ambiental y la humedad del fluido pueden realizarse de forma independiente a la medida de la velocidad con un barómetro, termómetro y psicrómetro, respectivamente. Otra posibilidad es utilizar un modelo de velómetro con sondas de temperatura y humedad implementadas. Algunos instrumentos realizan las correcciones y muestran directamente en pantalla el valor real de la velocidad.

La ecuación para realizar la corrección viene dada por:

$$d = 1,2 \cdot C_h \cdot C_p \cdot C_t \quad [\text{Ec. 4}]$$

donde

d: densidad del fluido, kg /m³

C_h: factor de corrección cuando la altura es ±300 m el nivel del mar.

C_p: factor de corrección si la presión estática en el conducto es superior a ±500 mmcda.

C_t: factor de corrección para temperaturas fuera del margen de 5 a 35 °C

Los factores C_h, C_p y C_t se calculan según las siguientes expresiones:

$$C_h = [1 - (22 \times 10^{-6}) h] \quad [\text{Ec. 5}]$$

5.258

donde:

h: altura sobre el nivel del mar, m

$$C_p = \frac{10340 + P_E}{10340} \quad [\text{Ec. 6}]$$

donde:

P_E: presión estática ⁽³⁾, mmcda

$$C_t = \frac{293}{273 + t} \quad [\text{Ec. 7}]$$

donde:

t: temperatura seca del aire, °C

Cuando simultáneamente se dan una altura distinta a la del nivel del mar y un alto contenido de humedad en el fluido, deben emplearse los diagramas psicrométricos. Estos pueden encontrarse en el texto "Ventilación Industrial" de la ACGIH (1).

Estas correcciones son importantes porque el caudal volumétrico aspirado por un ventilador es siempre el mismo y en cambio el caudal másico dependerá de la densidad del fluido. No son necesarias correcciones debidas a la humedad cuando el fluido se encuentra a una temperatura inferior a 40 °C.

Criterios para la selección de los instrumentos

La selección de cualquier instrumento de medida es función del grado de adecuación de sus especificaciones a las necesidades de la medición. Así, debe determinarse el rango de aplicación o campo nominal, sensibilidad, umbral de detección o discriminación, estabilidad, repetibilidad, exactitud, incertidumbre de medida y linealidad. La elección del instrumento está basada en un compromiso entre las anteriores características, siendo algunas de ellas principales y otras secundarias. Asimismo, intervienen condiciones específicas del conducto, que veremos más adelante.

La primera variable a considerar para seleccionar el instrumento adecuado cuando se afronta el problema de la medida del caudal en conductos es el rango de velocidades al que se estima que circula el fluido.

En términos generales, podemos definir las siguientes bandas:

TABLA 1
Rangos de velocidad en conducto

Rango de velocidades ⁽⁴⁾ (m/s)	Tipo de contaminantes
0 a 10	Vapores, gases, humos de combustión.
10 a 15	Humos de soldadura, polvos extremadamente finos
> 15	Resto de polvos más gruesos

Las siguientes variables juegan también un papel importante:

- Temperatura y humedad relativa del fluido. (Ver apartado 5 de esta Nota Técnica).
- Presencia de polvos y partículas que pudieran obturar las sondas falseando las lecturas o incluso dañando el equipo.

TABLA 2
Idoneidad de cada tipo de instrumento según velocidad y temperatura del fluido

Instrumento	Rango de velocidades óptimo	Rango aproximado de temperaturas	Observaciones
Tubo de Pitot	3 m/s (por debajo pierde precisión)	Cualquiera (max. 700 °C)	Para atmósferas polverulentas, tubos de Pitot en S. Robusto y manejable.

Anemómetros de molinete	5 - 40 m/s	< 350 °C	Algunos no están indicados para medidas en conducto por su tamaño.
Termoanemómetros	< 5 m/s (variable)	< 70 °C	Mecanismo delicado. Pueden incorporar sensores y software que permitan corregir por temperatura y humedad y obtener directamente la lectura de velocidad y caudal (introduciendo la sección).

- Presencia de componentes corrosivos en el fluido que pudieran dañar la sonda.
- Tipo de régimen del flujo, turbulento o laminar. Es siempre preferible medir la velocidad con flujos laminares y por lo tanto en el caso que nos ocupa debe optarse por un instrumento preparado para flujo turbulento.
- Aspectos prácticos como: manejabilidad, coste, robustez, ...

En la tabla 2 se muestra cuáles son los instrumentos que se aconseja usar en cada caso en función de la velocidad y la temperatura del fluido.

Bibliografía

1. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL HYGIENISTS
Industrial Ventilation.
ACGIH, 1992.
2. ALDEN J.L, KANE J.M.
Design of Industrial Ventilation Systems.
Industrial Press Inc. New York, 1982
3. BATURIN V. V.
Fundamentos de ventilación industrial.
Editorial Labor. Barcelona, 1976.
4. GARCÍA GUTIÉRREZ, L.
La medida del caudal.
AENOR, 1997.
5. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE
Maintenance, examination and testing of local exhaust ventilation
HSE Books, 1998.
6. BS 7258. Laboratory fume cupboards. British Standard Institution. London, BSI, 1994. Part 4. Method for determination of the containment value of a laboratory fume cupboard.
7. UNE-EN ISO 5167-1:1996 (ISO 5167-1:1991). Medición del caudal en fluidos mediante aparatos de presión diferencial. Parte 1.
8. UNE-EN ISO 5167-1/A1:1999. Medición del caudal en fluidos mediante aparatos de presión diferencial. Parte 1.
9. UNE 77225:2001. Fuentes estacionarias. Caudal volumétrico de gases. Método manual.
10. UNE 77227:2001. Fuentes estacionarias. Caudal volumétrico de gases. Método automático.
11. UNE-EN 24006:1997 (ISO 4006:1991). Medida del caudal en conductos cerrados. Vocabulario y símbolos.
12. UNE-EN ISO 9300:1995. Medida caudal de gas por toberas Venturi en régimen crítico.

(1) Si se trata de un conducto de sección rectangular se calcula el diámetro equivalente de conducto circular que se comportaría del mismo modo, mediante tablas o gráficos existentes en bibliografía (1).

(2) No deben promediarse los valores de PD en primer lugar, puesto que la relación entre PD y velocidad es cuadrática y el cálculo sería erróneo.

(3) Presión estática con su signo algebraico.

(4) En la práctica no se utilizan velocidades superiores a 25 m/s en sistemas de extracción localizada.
