

The background image shows a complex industrial or laboratory setup for gas flow measurement. It features several large, horizontal pipes with blue flanges and valves, mounted on a metal frame. In the foreground, a large, white, cylindrical component, possibly a flowmeter or a large valve, is mounted on a green metal cart with wheels. The scene is lit with a mix of blue and orange light, creating a technical and industrial atmosphere.

La Velocidad en Gases: ASPECTOS METROLÓGICOS

Luis E. García (lgarcia@cdtdegas.com)

Jair Angarita (jangarita@cdtdegas.com)

Omar Naranjo (oanaranjo@gmail.com)

RESUMEN.

Conscientes de la necesidad de proveer aseguramiento metrológico y trazabilidad a las mediciones de velocidad en gases realizadas en Colombia, especialmente en gases de combustión y aire, se resumen en este artículo los conocimientos y avances obtenidos por el CDT de GAS en relación al estado del arte, las aplicaciones, las tecnologías de medición, el aseguramiento metrológico y los desarrollos para brindar trazabilidad a éstas mediciones.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de medir la velocidad de gases se encuentra presente en diversidad de actividades de la industria, pasando por la investigación e incluso la recreación; en cada una de estas aplicaciones, se poseen requisitos metrológicos, más o menos rigurosos, dependiendo del riesgo asociado al resultado y la decisión tomada con base en este. Por tal razón, resulta necesario proveer trazabilidad a las mediciones de velocidad de gases, con niveles de incertidumbres adecuados acorde con el fin previsto.

En Colombia, el desarrollo metrológico en materia de velocidad de gases es incipiente, a tal punto que a diciembre de 2010, no existía laboratorio Acreditado por la SIC o por el ONAC, que permita brindar trazabilidad a las mediciones de velocidad. Es evidente que la velocidad de gases constituye una magnitud derivada, íntimamente relacionada con la magnitud flujo, cuya aplicación diseminada en diversas industrias y ámbitos, resulta de alta relevancia, pero, sobre la cual poco se ha estudiado en Colombia.

El presente artículo pretende presentar un resumen del estado del arte de las aplicaciones y tecnologías empleadas en la medición de velocidad en gases, las soluciones implementadas a nivel mundial para proveer trazabilidad a las mediciones relacionadas con esta magnitud y describir los desarrollos ejecutados por el CDT de GAS, como una contribución a las necesidades de aseguramiento metrológico en el país.

2 APLICACIONES DE LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN GASES

Las aplicaciones de la medición de velocidad de gases se pueden agrupar acorde con el medio en el cual se desarrolle el fenómeno de flujo a medir:

2.1 Medición de la velocidad de un gas en conductos cerrados

Esta aplicación se encuentra típicamente en la industria cuando se requiere determinar la velocidad puntual del fluido de interés o incluso su caudal volumétrico o másico.

2.1.1 Monitoreo de Gases de Chimenea

De las aplicaciones presentadas en la Fig. 1, la que presenta mayor difusión es el monitoreo de chime-

neas, realizado mediante muestreo isocinético, para determinar la concentración de contaminantes. Los muestreos isocinéticos se encuentran normalizados desde hace décadas por la EPA (Environmental Protection Agency de Estados Unidos) bajo el Código Federal de Regulaciones (CFR), cuyo objetivo principal es obtener muestras representativas de material particulado, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, entre otros [1]. Este código, actualmente, es la principal referencia técnica considerada en el “PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS”, el cual fue emitido por el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL en Abril de 2010 [2]. En el protocolo se adoptan los métodos EPA y se referencian acorde con el proceso industrial a monitorear. Del protocolo cabe anotar, que declara la necesidad de estimar las incertidumbres asociadas a las mediciones realizadas, pero no brinda lineamientos con rigor metrológico para realizar dichas estimaciones, ni declara la necesidad de garantizar la trazabilidad de las mediciones realizadas.

El monitoreo en fuentes fijas puntuales con chimeneas de tiro natural o forzado implica la evaluación de velocidades comprendidas entre los 3 m/s y los 17 m/s.

2.1.2 Ventilación Natural y Forzada de Recintos

En segundo lugar se encuentran las aplicaciones de ventilación en recintos, principalmente para garantizar la seguridad de personal en sitios confinados como recipientes, minas subterráneas, etc. En estos casos existen lineamientos de ventilación definidos por las normas de salud ocupacional aplicables y cuya verificación solo es posible mediante la medición de la velocidad del aire de renovación, que permite inferir según el área del conducto o túnel, el caudal de aire fresco administrado, o de vapores y gases extraídos.

En el sector minero los niveles de ventilación para túneles subterráneos se encuentran reglamentados por el Decreto No. 1335 de Julio 15 de 1987 “Reglamento de seguridad en las labores subterráneas” [3]. En el Título II Ventilación de dicho decreto, se establecen las velocidades del aire (máximas y mínimas), requeridas para garantizar una adecuada aireación. En las aplicaciones de ventilación, las velocidades son considerablemente bajas, requiriéndose mediciones en un alcance de 0,1 m/s a 6 m/s.

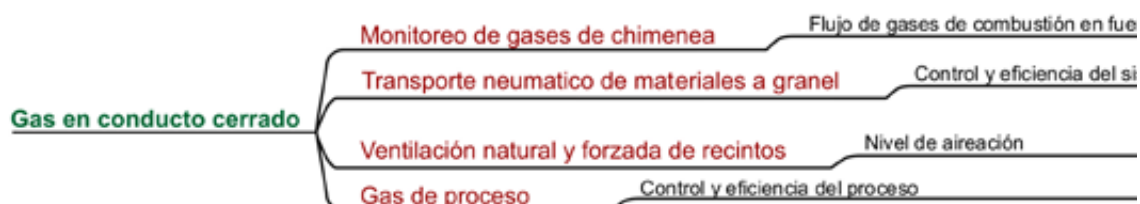


Figura 1. Aplicaciones en Conductos Cerrados

2.1.3 Gases de Proceso (Determinación de Caudal)

A nivel industrial existen procesos cuyo caudal debe ser estimado para efectos de controlar el proceso y mantenerlo dentro de límites de eficiencia aceptables. Tal es el caso del suministro de aire en sistemas de transporte neumático, en los cuales la velocidad del aire como fluido de arrastre es clave para garantizar el óptimo desempeño del sistema. Aunque es posible mediante la promediación sistemática de las mediciones puntualmente realizadas (en una posición determinada de la sección transversal), obtener el caudal del fluido de interés, la técnica puede requerir mucho trabajo y la incertidumbre de las mediciones obtenida es alta, para los requerimientos de proceso. Por esta razón se prefiere el uso de caudalímetros en lugar de medidores de velocidad.

En algunas aplicaciones como laboratorios farmacéuticos, campanas de extracción, secado de materiales, cabinas y hornos de pintura e incluso hornos para cerámica y ladrillos, la evaluación de la extracción eficiente de vapores, y la presencia de puntos muertos o de baja velocidad, que impiden obtener un secado u horneado homogéneo del producto, puede ser de interés.

2.2 Medición de la velocidad de un gas en espacios abiertos

La medición de la velocidad de gases en espacios abiertos se encuentra principalmente relacionada con la medición de la velocidad de los vientos en el ámbito meteorológico y aeronáutico. Sin embargo, existen algunas otras aplicaciones, como las recreativas, en las cuales la velocidad del viento es determinante para la seguridad y el buen desempeño de la actividad.

2.3 Meteorología (Velocidad y dirección del Viento)

La medición de velocidad del viento es la aplicación más difundida, su registro se realiza en estaciones meteorológicas y se utiliza para predecir el estado del tiempo, controlar operaciones aéreas y validar modelos meteorológicos. En Colombia, actualmente existen más de 300 estaciones meteorológicas ubicadas en aeropuertos, ciudades y zonas rurales, las cuales

conforman redes meteorológicas coordinadas por instituciones tales como: IDEAM, AEROCIVIL, FEDERACAFÉ, centros de investigación, y universidades, entre otros.

La información provista sobre la velocidad y dirección del viento en superficie, es además utilizada en sectores tales como: la arquitectura y la construcción para el cálculo de estructuras, y es determinante en la evaluación de potenciales Eólicos. Bajo condiciones normales y de acuerdo con el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia[4], la velocidad de los vientos en superficie no supera los 11 m/s.

Las aplicaciones comunes de medición de la velocidad en gases, expuestas hasta el momento, permiten concluir que éstas se efectúan bajo condición de flujo subsónico y se pueden considerar incompresibles, limitando el alcance de interés a bajas velocidades, generalmente inferiores a los 17 m/s.

3 TECNOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE GASES

La medición de velocidad de gases es una magnitud relacionada con el caudal volumétrico, tanto, que los medidores de velocidad más utilizados comparten principios de operación similares a los medidores de caudal más comunes. En la Tabla 3, se describen los tipos de medidores de velocidad comercialmente disponibles y su principio de operación, y en la Tabla 1 se resumen algunas características y desempeño metroológico típicos, que permite obtener una comparación de las tecnologías.

4 ASEGURAMIENTO METROLÓGICO Y TRAZABILIDAD

La revisión de las tecnologías de medición para velocidad de gases y sus aplicaciones, pone en evidencia la necesidad de aseguramiento metroológico para esta magnitud, por lo cual es necesaria la calibración con periodos que oscilan entre uno y cinco años [5], [6] dependiendo de la tecnología, las condiciones de trabajo del medidor y los requerimientos del usuario.

4.1 TÚNELES DE VIENTO

Por tratarse de una magnitud asociada a un fenómeno de flujo (caudal), la calibración de medidores de velocidad en gases, requiere de una instalación para la generación del fenómeno bajo condiciones controladas y de un patrón de referencia trazable a patrones del SI⁴. La instalación utilizada es conocida como túnel de viento (Fig. 2) y se pueden presentar diversas configuraciones, entre otras: circuito abierto o circuito cerrado, flujo inducido

Instrumento	Tipo	Principio	Alcance m/s	Clase o EMP ^a	Costo
Pitot Estándar y S	Raíz cuadrada	Presión Dinámica	1 - 50	3% E.T. ²	Bajo
Pitot Tipo S	Raíz cuadrada	Presión Dinámica	1 - 50	4% E.T. **	Bajo
Anemómetro de Copa	lineal	Mecánico	1 - 75	1% L.L. ³ - 2% E.T.	Medio
Anemómetro de paletas	lineal	Mecánico	1 - 60	3% L.L. - 2% E.T.	Bajo
Anemómetro de propela o turbina	lineal	Mecánico	1 - 65	2% L.L. - 2% E.T.	Medio
Anemómetro de hilo caliente	lineal	Térmico	0,5 a 30	2% E. T.	Medio
Anemómetro Ultrasónico	lineal	Ultrasónico	0,1 - 60	0,1 m/s (V<5m/s) 1% L.L. (v ≥ 5 m/s)	Alto
Anemómetro LDA	lineal	Óptico	0,1 - 300	0,30%	Alto

^aError Máximo Permisible.

** Para una alineación mejor a 15° del flujo.

Tabla 1. Medidores de Velocidad de gases¹

o forzado, subsónicos, transónicos, supersónicos o hipersónicos, aunque, debido a las bajas velocidades de interés en las aplicaciones comunes, son aplicables solo los túneles subsónicos.

El diseño interno del túnel puede variar con el fin de proveer condiciones de flujo lo suficientemente estables como para lograr un perfil uniforme y sin fluctuaciones significativas, lo cual se logra mediante la utilización de elementos tales como, zonas de contracción de flujo, acondicionadores de flujo, y pantallas (screens). Usualmente el intervalo de trabajo puede encontrarse entre los 0,5 m/s hasta los 60 m/s [7].

A nivel internacional existen normas y recomendaciones de instituciones tales como ASTM, ISO, IEC, y MEASNET, entre otras, que especifican los requerimientos básicos de un túnel de viento para la calibración de medidores de velocidad. Un resumen de tales requerimientos es presentado en la Tabla 2 [8].

4.2 PATRONES DE REFERENCIA

Para proveer trazabilidad a las mediciones realizadas en túneles de viento, tradicionalmente se han utilizado tubos Pitot tipo L, asociados a micromanómetros electrónicos, pero este tipo de patrón posee una desventaja, su alta incertidumbre, que radica en la dificultad de medir muy bajas presiones (< 200 Pa). A pesar de ello continúan siendo un patrón económico y fiable para proveer trazabilidad. Tal es el caso, que en la reciente Comparación Euromet.M.FF-K3 [9], fue utilizado como patrón de transferencia un Tubo Pitot con Amplificador, desarrollado por NMI-VSL⁵.

En la actualidad, los LDA, se imponen como patrones de referencia, debido a su baja incertidumbre, la



Figura 2. Túnel de viento de circuito abierto y flujo inducido (IPT en Sao Paulo)

Característica	Descripción	Requerimiento
Relación de Bloqueo	Relación del área frontal del Anemómetro y su base, al área del túnel en la sección de prueba.	<0,1 para sección de prueba abierta <0,05 para sección de prueba cerrada
Capacidad	Alcance de velocidad controlada que puede obtener el túnel	Al menos el 50% del alcance de los Anemómetros a calibrar.
Uniformidad del Flujo	Diferencia porcentual de la velocidad del aire sobre la sección de prueba	< 0,2% en dirección longitudinal, transversal y vertical
Gradiente de velocidad horizontal	Diferencial de presión dinámica en el área cubierta por el anemómetro	< 0,2 %
Intensidad de turbulencia	Relación entre la velocidad instantánea del Anemómetro patrón y la velocidad media del túnel	< 2 %
Uniformidad de la densidad	Máxima diferencia de la densidad del aire en la sección de prueba	< 3%
Estabilidad	Variación máxima de la velocidad del túnel durante una prueba.	±0,2 m/s
Sistema de adquisición de Datos	Resolución	±0,02 m/s
	Frecuencia de registro	≥10 Hz

Tabla 2. Requerimientos Túnel de Viento

ventaja de ser una tecnología no intrusiva y la posibilidad de medir la velocidad en los tres ejes. La calibración de los patrones de referencia generalmente es realizada en un laboratorio de mayor jerarquía, incluso NMI, los cuales han desarrollado métodos para que las mediciones de la magnitud principal (velocidad) y las magnitudes asociadas sean trazables al SI.

En el caso de los Pitot tipo L, no existe un método primario de calibración, simplemente se verifica la forma del Pitot y se controlan las condiciones del túnel para aproximarse al comportamiento ideal basado en el principio de Bernoulli (Ver Ec 1). Actualmente, se han desarrollado métodos para evaluar el coeficiente C_{PL} de los Pitot, permitiendo la corrección de la velocidad por efectos tales como la intensidad de turbulencia, el factor de compresibilidad, y la carencia de uniformidad en la sección de prueba[10].

En la calibración de los LDA es principalmente utilizado el método del disco en rotación, que consiste en determinar la velocidad tangencial de un elemento ubicado sobre el disco, a un radio conocido, y el cual gira a una velocidad angular conocida [11]. De esta manera se obtiene trazabilidad a patrones de longitud y tiempo.

Actualmente es posible reproducir y medir velocidades en túneles de viento, con incertidumbres comprendidas entre 0,1% y 10%⁶ dependiendo principalmente del patrón de referencia y el intervalo de medición [6]. Para obtener una visión del grado de desarrollo en torno a los túneles de viento y los patrones utilizados para brindar trazabilidad a las mediciones de velocidad, se presenta en la Tabla 4 algunos de los principales países y laboratorios que han participado en las KC del CIPM.

5 PANORAMA Y DESAFÍOS A NIVEL NACIONAL

A nivel nacional, la información disponible es escasa. Existen algunos túneles de viento, cuyos usos se enfocan, principalmente, hacia aplicaciones aerodi-

¹ Características típicamente declaradas por fabricantes de equipos acorde con la tecnología del instrumento.

² Escala Total

³ Lectura Indicada

⁴ Sistema Internacional de Unidades, abreviado SI del francés: Le Système International

⁵ NMI-Van Swinden Laboratoriu

⁶ Las incertidumbres declaradas en el presente artículo corresponden a Incertidumbres expandidas (k=2)

(1) Tubo Pitot

Los tubos pitot datan del siglo XVIII, y su principio se basa en el hecho que la velocidad del fluido es proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial (dinámica) obtenida. Existen dos tipos comunes:

- 1 **Pitot Estándar**, tipo L, o también llamado Prandtl, en honor a su inventor, quien combinó un tubo pitot con un anillo piezómetro para obtener la presión dinámica del flujo. La velocidad es obtenida matemáticamente, mediante la Ec 1, que resulta de la aplicación del principio de Bernoulli para flujo incompresible:
Ec 1.

$$V = C_{PL} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_d}{\rho_{gas}}}$$

V : Velocidad del gas [m/s]
 C_{PL} : Coeficiente de flujo del Pitot ($\cong 1$)
 P_d : Presión Dinámica [Pa]
 ρ_{gas} : Densidad del gas [kg/m³]

- 2 **Pitot Tipo S (Stausscheibe)**, cuyo principio de operación es similar al tipo L, pero solo cuenta con un orificio para sensar la presión estática. La presión dinámica es obtenida como la diferencia entre la presión total del orificio que se enfrenta al flujo y la presión estática del orificio opuesto.

Este tipo de medidores posee poca sensibilidad a bajas velocidades, debido a la pequeña presión diferencial que se genera, y se ven afectados por el desalineamiento respecto a las líneas de flujo. El coeficiente (ideal) de flujo del Pitot L es 1 y el del tipo S es 0,84. Sin embargo, bajo condiciones reales este coeficiente varía con cada Pitot, motivo por el cual es necesaria la calibración del ensamble Pitot + medidor de presión diferencial en un túnel de viento, utilizando como referencia un patrón trazable.

(2) Anemómetro de Copa, Molinete o Cazoleta

Este anemómetro está constituido por un eje, que se ubica en posición vertical, al cual se conectan 3 brazos con copas generalmente hemisféricas. Al actuar la fuerza del viento sobre las copas, las hace girar proporcionalmente a la velocidad (del viento), independientemente de su dirección y por eso son considerados omnidireccionales, en el plano horizontal.

El registro de la velocidad se puede realizar en cartas de papel, en cuyo caso son llamados anemógrafos, pero actualmente, con los avances en la electrónica, poseen registro en memorias no volátiles. La mayoría tiene salida analógica en tensión o corriente, proporcional a la velocidad, aunque la tendencia es el uso de salidas en frecuencia.

En estos anemómetros, la simetría, el momento de inercia, y el torque por fricción en torno del eje de giro, son claves para obtener un buen desempeño metrológico. Bajo condiciones de viento estable el anemómetro de copa posee un comportamiento lineal (ver Ecuación 2), pero es sensible a la turbulencia, ya que genera sobrerrevolución y errores sistemáticos, especialmente cuando la magnitud de interés es la velocidad promedio sobre una base de tiempo.

Bajo condiciones ideales, la velocidad indicada por el anemómetro se puede representar por la Ec 2.

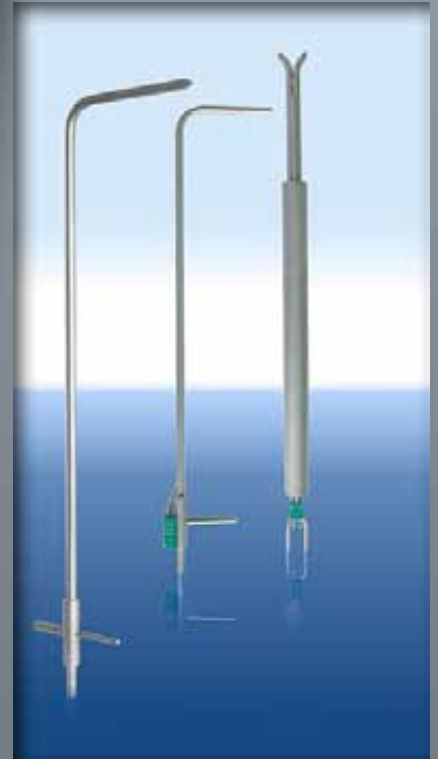
Ec 2.

$$V = f \times r \times S = S \times l$$

- V : Velocidad horizontal del viento [m/s]
 r : Radio del centro de giro al centro de las copas [m]
 f : Factor del Anemómetro, que depende del diámetro de la copa y el radio r. Varía de 2,5 a 3,5.
 S : Velocidad angular en rad/s
 l : Distancia calibrada⁷ [m]; longitud de la columna de aire que ha pasado a través del anemómetro, cuando éste ha girado un ángulo correspondiente a un radián.

Su principal aplicación se halla en las estaciones meteorológicas, y debido al auge de las energías renovables como la Eólica, en las últimas décadas se han desarrollado grandes avances en la caracterización y normalización de este instrumento, puesto que se podría generar un alto impacto financiero al proyectar un parque eólico con base en un potencial sobreestimado.

⁷ No debe confundirse el término "Distancia Calibrada" con "Constante de distancia", definida como la longitud de la columna de aire que ha pasado para que la respuesta del Anemómetro sea el 63% de su respuesta total. Esta definición es aplicable a cualquier tipo de Anemómetro mecánico.



Izq. y centro: Pitot Tipo L - Der. Pitot Tipo S
http://img.directindustry.fr/images_di/photo-g/tube-de-pitot-266584.jpg



Anemómetro de Copa
http://www.volker-quaschnig.de/fotos/messung/Anemometer_1024x768.jpg



Anemómetro de Paletas
<http://www.ruby-electronics.com/images/mtr-dt-619-d.jpg>

(3) Anemómetro de Paletas

Poseen un rotor que gira a velocidad angular proporcional a la velocidad del fluido. El rotor es diseñado para extraer la mayor cantidad de energía del flujo, manteniendo la proporcionalidad y al igual que los demás anemómetros mecánicos (Copa y Propela), la simetría, el momento de inercia y la fricción en el eje de rotación son claves para el desempeño metroológico del instrumento.

Inicialmente fueron desarrollados para aplicaciones fijas, pero se han convertido en uno de los anemómetros portátiles más populares, pues en combinación con otros sensores de magnitudes tales como presión, temperatura y humedad relativa, permiten el registro continuo de las variables ambientales básicas.

Los anemómetros de paletas presentan errores debido principalmente a las fluctuaciones laterales del fluido y al deterioro mecánico del rotor (alta fricción).



Anemómetro de Propela
http://www.volker-quaschnig.de/fotos/messung/Fluegelrad_1024x768.jpg

(4) Anemómetro de Propela

Basado en el funcionamiento de los antiguos molinos de viento, este tipo de anemómetro provee la velocidad y dirección del viento. En este caso un eje horizontal, que gira libremente sobre un eje vertical, posee una hélice en uno de sus extremos y una aleta en el extremo opuesto, la cual actúa como timón, manteniendo enfrentada la hélice a la corriente de viento predominante.

La proporcionalidad entre la velocidad angular de la hélice y la velocidad del viento puede describirse mediante la misma ecuación aplicable a los anemómetros de copa.

Ec 3.

$$V = S \times l$$

- V : Velocidad del viento [m/s]
- S : Velocidad angular [rad/s]
- l : Distancia calibrada [m]; longitud de la columna de aire que ha pasado a través del anemómetro, cuando éste ha girado un ángulo correspondiente a un radián.

(5) Anemómetro de Hilo Caliente

El más común consiste de un hilo de Platino o Tungsteno, muy fino (Aprox. 4 μm a 10 μm de diámetro y 1 mm de longitud), que se calienta algunos grados sobre la temperatura ambiente. Al pasar el flujo de aire se genera un efecto de enfriamiento por convección, que varía la resistencia del hilo. Debido a que ésta depende de la temperatura, es posible relacionar la resistencia del hilo con la velocidad del flujo, a partir de la potencia eléctrica suministrada.

Dependiendo del arreglo electrónico utilizado para transducir la velocidad, existen tres tipos comunes, según la variable a mantener constante:

- CCA: Anemómetro de corriente constante
- CVA: Anemómetro de voltaje constante
- CTA: Anemómetro de temperatura constante.

Este tipo de anemómetro posee una respuesta rápida y permite evaluar pequeños cambios de velocidad, por lo que es muy utilizado a nivel de investigación para evaluación de efectos de turbulencia. Sus desventajas radican en lo delicado que es el hilo, debido a sus pequeñas dimensiones, y la alta sensibilidad al material particulado, que puede contaminar el sensor, y generar desviaciones en su indicación.

En la configuración estándar de los sensores, el hilo se ubica perpendicular al flujo, situación que los hace sensibles al desalineamiento, pero que ha sido parcialmente solucionada con la implementación de hilos en los tres ejes coordenados.

Existen variaciones en la forma (bi y triaxiales) y el tipo de sensor, tales como las fibras de cuarzo o microformas recubiertas de níquel, las cuales son más robustas que los sensores tipo hilo, pero poseen una respuesta más tardía.

Matemáticamente, bajo condiciones estables y despreciando efectos de conducción y radiación, la velocidad del fluido se puede aproximar al considerar que la potencia eléctrica suministrada es igual a la energía disipada por efecto de convección en el hilo. En la Ec 4 se presenta la solución analítica

Ec 4.

$$V = \left(\left(\frac{I^2 R_0 (1 + \alpha(T_c - T_{ref}))}{A_c (T_c - T_f)} - a \right) / b \right)^{1/c}$$

- V : Velocidad del gas [m/s]
- I : Corriente Eléctrica
- R_0 : Resistencia eléctrica del cable a condiciones de referencia
- α : Coeficiente lineal de resistencia térmica
- A_c : Área transversal del cable
- T_c : Temperatura del cable
- T_{ref} : Temperatura de referencia
- a, b, c : Constantes



Arriba: Anemómetro de Hilo Caliente
Abajo: Sonda Triaxial CTA
<http://news.thomasnet.com/companystory/Economical-Hot-Wire-Anemometer-Series-HHF42-823026>



Anemómetro Ultrasonico-Principio Tiempo de Tránsito
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Eddy_Covariance_IRGA_Sonic.jpg

(6) Anemómetro Ultrasonico

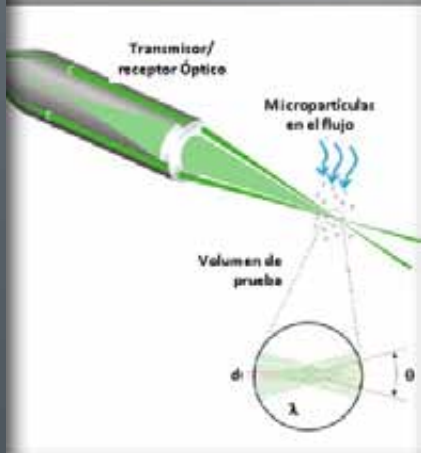
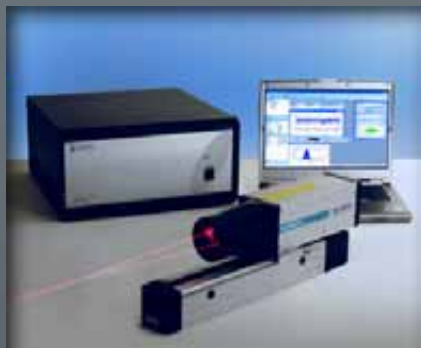
Este instrumento comparte el principio de tiempo de tránsito utilizado por los medidores de caudal, que en esencia son medidores de velocidad. Su operación consiste en la emisión simultánea de pulsos, desde un par de transductores-receptores enfrentados a una distancia L (Ver Ec 5). Los pulsos llegarán al mismo tiempo al transductor opuesto, cuando la velocidad del aire es cero, pero se presentará una diferencia en el tiempo de tránsito, cuando se presente flujo y la velocidad sea diferente de cero.

Estos Anemómetros pueden poseer 1, 2 o 3 trayectorias, con longitudes de 10 cm a 20 cm, que permiten obtener la velocidad en los tres ejes coordenados. Poseen una alta velocidad de respuesta, incluso superior a los anemómetros de hilo caliente, por lo cual son utilizados para evaluación de turbulencia. Al no poseer partes móviles, requieren menos mantenimiento que los anemómetros mecánicos, por lo que su uso se ha extendido en estaciones meteorológicas. Sin embargo, poseen desventajas como la distorsión de las líneas de flujo debido a los soportes de los transductores, lo cual hace necesaria su caracterización y calibración en un túnel de viento. Adicionalmente, en presencia de lluvia la velocidad del sonido puede variar, generando desviaciones en la indicación de velocidad.

Ec 5.

$$V = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right)$$

- V: Velocidad del viento [m/s]
- L: Longitud de la Trayectoria entre transductores [m]
- t_{AB}: Tiempo de tránsito de A => B [s]
- t_{BA}: Tiempo de tránsito de B => A [s]



Anemómetro laser Doppler - Principio LDA
http://www.dantecdynamics.com/files/billeder/Web_NewsEvents/Flowexplorer2dw.jpg

(7) Anemómetro Láser Doppler

Los Anemómetros Láser Doppler, infieren la velocidad de un gas a partir de las partículas arrastradas por el flujo, lo cual implica que la corriente de gas debe poseer partículas comprendidas entre los 0,5 μm hasta 5 μm, tamaño máximo para el cual se puede considerar que las partículas viajan a la misma velocidad del gas.

Un haz de luz es dividido en dos haces de diferente frecuencia, que se re-enfocan para cruzarse en un pequeño volumen de unos cuantos milímetros, fuera del anemómetro (por lo que se constituye en un instrumento no intrusivo). La intensidad de la luz es modulada debido a la interferencia entre los haces, formando franjas de alta intensidad y es posible definir la distancia entre las franjas (d_f) a partir de la longitud de onda de la luz láser (λ) y el ángulo formado entre los haces (θ). Al pasar las partículas por el volumen formado, se interrumpen los haces con una frecuencia (f_D) proporcional a la velocidad de las partículas

Ec 6.

$$V = d_f \cdot f_D = \frac{\lambda \cdot f_D}{2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

- V: Velocidad del gas [m/s]
- d_f: Distancia entre franjas de luz [m]
- λ: Longitud de onda [m]
- f_D: Frecuencia Doppler (Hz)
- θ: Ángulo entre los haces que forman el volumen de prueba.

Es posible intersecar haces en los 3 planos ortogonales con el objeto de evaluar la velocidad en las tres direcciones, razón que lo hace muy útil en áreas de investigación de fenómenos de flujo y como patrones de referencia en Laboratorios.

País	Laboratorio	Método o Patrón de referencia	Alcance de Medición [m/s]	Incertidumbre % [±]
Estados Unidos	NIST	LDA – Disco rotativo	0,3 - 10,2	1,5 - 0,4
Suiza	METAS	Medidor portátil en túnel abierto	1,3 - 67	---
Alemania	PTB	1. LDA - Disco rotativo 2. LDA - túnel abierto 3. LDA - túnel cerrado	0,1 - 15 0,5 - 60 0,2 - 60	0,10 5,0 - 0,08 0,50
Holanda	NMI	Medidor portátil en túnel abierto	0,1 - 1,0 1,0 - 50	30 - 1,0 1,0
Brasil	IPT	Tubo Pitot L Hilo Caliente (CTA)	2 - 40	---
México	Labinthab	LDA	5 - 30	---
Francia	CETIAT	LDA	0,05 - 2 0,15 - 40	20 - 1,0 6 - 0,6
Turquía	UME	Tubo Pitot L	0,50 - 20	0,9
Lituania	VMT/LEI	Tobera convergente Pitot L en túnel cerrado	0,2 - 3,0 3,0 - 60	7,0 - 3-0 3,0 - 1,0
Estonia	UTC	Tobera	4,0 - 40	4,0 - 2,0

Tabla 4. Túneles de viento y Patrones para aplicación Metrológica [9], [10], [11]

námicas (EAFIT, Aerocivil, Universidad Nacional, Universidad Los Libertadores y Alhametrología Ltda, entre los que se tiene conocimiento) más que para su aplicación metrológica. Incluso se desarrolló recientemente por parte de la Universidad EAFIT y la Universidad de los Andes, con apoyo de la Universidad de Alberta (Canadá), un túnel de viento virtual, en un ambiente colaborativo, que permitirá realizar estudios de Aerodinámica, Aeronáutica, Arquitectura, etc. con todas las ventajas que las soluciones CFD⁹ provee, sin embargo, la trazabilidad para las mediciones solo puede ser provista mediante la comparación directa de las indicaciones del instrumento de interés y un patrón trazable al SI, en un espacio que permita reproducir la velocidad de un gas bajo condiciones controladas. Lo interesante de este desarrollo para el ámbito metrológico, es la aplicación que del mismo puede realizarse para diseñar, desarrollar u optimizar las instalaciones (túneles de viento), con el objeto de proveer secciones de acondicionamiento de flujo y de prueba que provean características de desempeño, como las tratadas en la Tabla 2.

Tal y como se expuso en el numeral 2, en Colombia existen normativas, regulaciones, y aplicaciones que requieren del aseguramiento de la velocidad de gases, principalmente gases de chimenea, vapores y aire bajo condiciones cercanas a las atmosféricas. Empero, el país no cuenta actualmente con el capital humano, el conocimiento y la infraestructura metrológica, que se constituyen en los principales recur-

sos para proveer trazabilidad y asegurar las mediciones de velocidad en gases.

En relación a la infraestructura, si se desea implementar, para Colombia, un túnel de viento con un LDA o CTA como patrón de referencia, se puede requerir de grandes inversiones para su adquisición, mantenimiento y trazabilidad. Por ejemplo, para el caso de Cuba, el túnel adquirido a inicios de 2010, tuvo un costo de 100.000 Euros [12], esto excluyendo el valor del patrón de referencia, que para el caso de un LDA, puede llegar a costar 80.000 USD.

Al evidenciar las necesidades y falencias tratadas con anterioridad, el CDT de GAS, inició estudios y desarrollos con los que pretende:

- Formar personal en el área de la metrología de la velocidad en gases
- Proveer trazabilidad y garantizar las mediciones de velocidad en gases
- Evaluar el desempeño de los instrumentos de medición de las tecnologías comúnmente utilizadas en el país y aquellas emergentes.
- Realizar estudios de los fenómenos de flujo que afectan las mediciones de velocidad.

Los primeros avance y desarrollos obtenidos por el CDT de GAS, en esta materia son descritos a continuación.

6. DESARROLLOS Y AVANCES OBTENIDOS EN EL CDT DE GAS

Tal y como fue proyectado, el Banco de Alto Caudal desarrollado por el CDT de GAS, inició en 2010 su aplicación en una nueva área de estudio, como lo es la Anemometría. Para ello se diseñó, construyó y caracterizó un dispositivo (túnel de viento) de 300 mm de diámetro interno en su sección de prueba, que acoplado al Banco (Ver Fig. 3) permite realizar estudios sobre el desempeño de medidores de velocidad, calibrar instrumentos de diversas tecnologías y servir

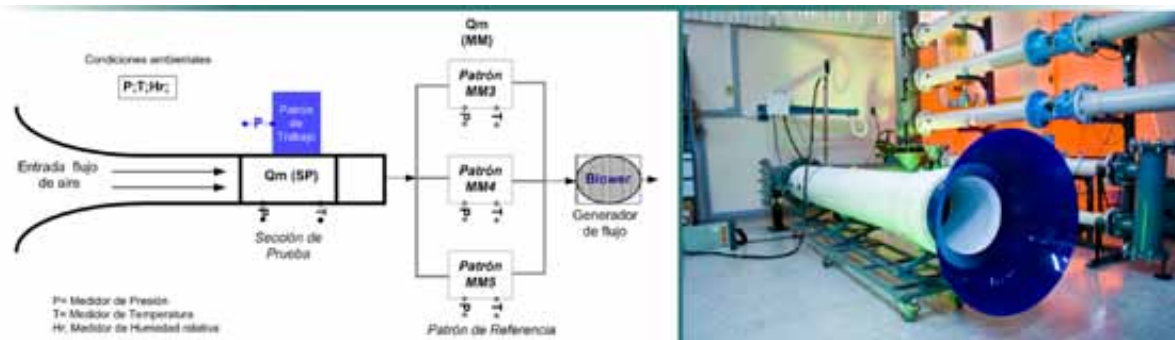


Figura 3. Concepto del Prototipo de túnel de viento - Izq: Fotografía del Túnel

Tipo de Túnel	Abierto Subsónico Aspirado
Sección de prueba circular	$\phi = 300$ mm y long: 1000 mm
Patrón de referencia	Medidores Volumétricos tipo Turbina
Trazabilidad	PTB de Alemania (Volumen) SIC y otros (Presión, Temperatura, tiempo, %HR)
Alcance del Túnel y patrones de Referencia	0,5 m/s a 20 m/s
Incertidumbre	4 m/s a 20 m/s U= 10 % L.I. a 3 % L.I. (k=2)
Patrón de Trabajo (Pitot L)	
Instrumentos a Calibrar	Pitot L y S, Paleta, Hilo Caliente y Ultrasonico ⁹

Tabla 5. Características del Túnel de Viento del CDT de GAS

de instalación de experimentación y entrenamiento para la apropiación y generación de conocimiento en temas como fenómenos de flujo y trazabilidad en la magnitud velocidad.

El concepto se basa en la Ley de la conservación de la masa y la Ley de gases ideales, mediante las cuales es posible evaluar el caudal volumétrico a condiciones de la sección de prueba, y al caracterizar la forma del perfil sobre el alcance de velocidad del Túnel, es posible conocer la velocidad puntual reproducida como función del radio de la sección. Para calibrar el instrumento de interés, este se ubica en el túnel a una profundidad fija correspondiente a la velocidad media del flujo, y a partir de la caracterización, se realiza la corrección por la forma del perfil de velocidad. Un método similar para brindar trazabilidad a instrumentos de velocidad de gas es utilizado por NMI-VSL [10].

Como resultado de los esfuerzos realizados por el CDT de GAS para proveer trazabilidad a las mediciones de velocidad en gases, la Corporación logró consolidar un prototipo de Túnel de viento, que cumpliendo con los requisitos de la ISO/IEC 17025, posee las características que se listan en la Tabla 5. Se prevé entonces, iniciar la prestación de servicios de calibración, a partir del 2011.

7 CONCLUSIONES

- Las tecnologías de medición se encuentran disponibles, pero, para hacer un buen uso de ellas y optimizar recursos, en la adquisición, mantenimiento, operación y aseguramiento metrológico, es necesario adquirir una base de conocimiento que permita tomar decisiones acorde con el nivel tecnológico de nuestro país y los requerimientos de los procesos de medición de velocidad en gases.
- La medición de velocidad de gases representa un nuevo reto tecnológico, que de igual manera al caso de volumen y caudal, desarrollado por el CDT de GAS, debe ser estudiado a profundidad para apropiar y aplicar los conocimientos en pro del aprovechamiento de las tecnologías disponibles.
- Es necesario aunar esfuerzos y aprovechar herramientas, que como el Túnel Virtual desarro-

⁸ La mayor incertidumbre relativa corresponde a la menor velocidad.

⁹ Computational Fluid Dynamics.

¹⁰ La limitación actual es debida a la relación de bloqueo debido al pequeño tamaño de la sección de prueba ectura Indicada.

llado por las universidades EAFIT, LOS ANDES, y ALBERTA, permitirían reducir el ciclo de desarrollo de instalaciones para aplicaciones metrológicas, optimizando los recursos disponibles en el País.

• Los desarrollos realizados con el prototipo de viento del CDT de GAS se constituyen en un primer esfuerzo hacia el establecimiento de una cadena

de trazabilidad, para algunos de los más comunes instrumentos de medición de velocidad en gases (Pitot, Paletas, hilo caliente y ultrasonico), el cual fue posible gracias al aprovechamiento alternativo del Banco de Alto Caudal y la identificación de las necesidades de trazabilidad a través de los procesos de vigilancia tecnológica.

- Ante el amplio panorama que representa el aspecto metrológico de la Velocidad en Gases, el CDT de GAS continuará realizando avances, en compañía de instituciones interesadas, para brindarle al país, los recursos que le permitan asegurar las mediciones y desarrollos de esta importante magnitud.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Manual del Inventario de emisiones de fuentes fijas - IEFI. Empresas Públicas de Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana. Junio 2008
- MAVDT. Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. Abril de 2010
- MINMINAS. DECRETO No. 1335 de Julio 15 de 1987 Mediante el cual se expide el reglamento de seguridad en las labores subterráneas.
- MAVDT - IDEAM - UPME. Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. 2006
- Risø National Laboratory. ACCUWIND - Accurate Wind Speed Measurements in Wind Energy. Denmark 2006.
- T.T. Yeh y J.M. Hall. Airspeed Calibration Service. Fluid Metrology Group. NIST Special Publication 250-79.
- Diseño y Construcción de una Instalación para la Calibración de Medidores de Velocidad de Aire utilizando como Patrón el Banco de Alto Caudal del CDT de Gas. Jair Fernando Angarita, Proyecto de Grado, Ingeniería Mecánica. Director, Javier Rugeles; Codirector, Luis Eduardo García, CDT de GAS. Universidad Industrial de Santander.
- Coquilla V. Rachael. Review of Anemometer Calibration Standards Otech Engineering, Inc., Davis, CA.
- Euromet M.FF-K3 Key Comparison for Airspeed Measurements Draft B, 2008.
- CIPM. CCM.FF-K3, Final Report on the CIPM Air Speed Key Comparison, 2007.
- T.T. Yeh and J. M. Hall. Uncertainty of NIST Airspeed. 2008
- <http://www.granma.cubaweb.cu/2010/04/07/nacional/artic18.html>
- APMP.M.FF-K3 Final Report Draft B on the APMP Air Speed Key Comparison. July, 2010 (Revised)
- Eslava T. Guilbaldo y otros. La calibración anemométrica para el recurso eólico. Caos Conciencia 4:5-11, Labinthap Universidad de Quintana, 2009.
- http://www.nist.gov/pml/process/fluid/air_speed.cfm
- Bernie Leland et al. Correction of S-Type Pitot-static Tube Coefficients When Used for isokinetic sampling from Stationary Sources. Engineering Research Institute. Dpt. Of Mechanical Engineering, Iowa State University Julio 1977
- Bela G. Liptak. Flow Measurement. 2003.