



Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en túnel de viento

Patricia Martín Rodríguez¹, Eduardo Martín Rodríguez², Acir Mércio Loredo-Souza³, Edith Beatriz Camano Schettini⁴,

¹Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, email: patriciamr@civil.cujae.edu.cu

²Centro de Investigaciones de Microelectrónica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, email: eduardo.martin@electronica.cujae.edu.cu

³Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, acir@ufrgs.br

⁴Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, bcamano@iph.ufrgs.br

RESUMEN / ABSTRACT

La calidad de las mediciones de las velocidades de viento en un túnel de viento depende en gran medida de la correcta utilización de los instrumentos utilizados para obtenerlas, por esta razón es de gran importancia conocer las características y potencialidades que presentan los instrumentos utilizados para este fin. El anemómetro de hilo caliente es el instrumento más utilizado en los túneles de viento para las mediciones de las características de las fluctuaciones de la velocidad del viento, estas características son de gran importancia ya que para simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento es necesario desarrollar un modelo físico del flujo turbulento atmosférico de manera tal que los parámetros que lo caracterizan se reproduzcan lo más fielmente posible dentro del túnel. Este trabajo tiene como objetivos describir las características del anemómetro de hilo caliente a temperatura constante que permiten la obtención de las características de las fluctuaciones de las velocidades de viento y ejemplificar la aplicación de CTA para obtención de velocidades en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones de la UFRGS, Brasil.

Palabras claves: anemómetro de hilo caliente a temperatura constante, velocidades de viento, túnel de viento.

The quality of measurements of wind velocities in a wind tunnel depends heavily on the proper use of the instruments used to obtain them, for that reason is very important to know the features of these instruments. The hot-wire anemometer is the most used instrument in wind velocity measurements and their fluctuations on a wind tunnel. The features of wind velocity fluctuations are very important because for the simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel is necessary to develop a physical model of atmospheric turbulent flow, so that, the parameters which characterize them are reproduced as closely as possible inside the wind tunnel. The aim of this paper is to describe the characteristics of hot-wire anemometer at constant

temperature which produce the characteristics of fluctuating wind speeds and exemplify the application of CTA to obtain speeds in the wind tunnel of the Aerodynamics Laboratory Constructions of UFRGS, Brazil.

Título en Inglés: *Using constant temperature hot wire anemometer for measuring velocity in a wind tunnel.*

Key words: *constant temperature hot wire anemometer, wind speeds, wind tunnel.*

INTRODUCCIÓN

Las velocidades y fluctuaciones de flujos pueden ser obtenidas según diferentes metodologías, como pueden ser: anemometría de hilo caliente, Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) o Anemometría Lasser-Doppler (LDA). La metodología de anemometría de hilo caliente es la más utilizada para medidas de la turbulencia en flujos por ser la más económica y por presentar una alta respuesta en frecuencia [1]. En los túneles de viento son utilizados para mediciones de velocidad el tubo de Pitot y el tubo de Pitot-Prandtl conjuntamente con las mediciones de presiones estáticas y dinámicas dentro del túnel, sin embargo esta técnica tiene como desventaja que solo se pueden obtener velocidades medias y no las fluctuaciones de la velocidad del viento. Las características de las fluctuaciones de la velocidad en un túnel de viento son de gran importancia ya que para simular la capa límite atmosférica es necesario desarrollar un modelo físico del flujo turbulento atmosférico de manera tal que los parámetros que lo caracterizan se reproduzcan lo más fielmente posible dentro del túnel. Surry [2] estableció que bajo condiciones de vientos fuertes en estabilidad neutra se deben reproducir las siguientes características: i) La variación espacial de velocidades medias; ii) la distribución espacial de las tres componentes de la intensidad de turbulencia (con frecuencia simplificada solamente a la componente longitudinal); iii) las correlaciones longitudinales y transversales de las tres componentes de la turbulencia, usualmente referidas como las escalas longitudinales y laterales de la turbulencia (con frecuencia simplificada solamente a la escala longitudinal); iv) espectro de potencia de las tres componentes de la turbulencia (con frecuencia simplificada solamente a la componente longitudinal)”. Para la obtención de las características intensidad de la turbulencia, escalas de la turbulencia y espectros de potencia es necesario realizar mediciones de las fluctuaciones de la velocidad del viento para lo cual el instrumento más utilizado en los túneles de viento es el anemómetro de hilo caliente a temperatura constante (CTA) [3-10], por esta razón es de gran importancia el estudio de las características de este instrumento.

Un anemómetro de hilo caliente consiste en un filamento calentado que queda expuesto al paso de un flujo. Este filamento está conectado a un circuito eléctrico que es capaz de monitorear las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Entonces, se puede establecer una relación de pertinencia entre la velocidad del flujo y la resistencia observada en el filamento calentado [11].

El principio físico de funcionamiento de los anemómetros de hilo caliente está basado en la transferencia de calor por convección entre el hilo calentado y el flujo pasando a su alrededor. En estos sensores, una pequeña estructura es calentada y expuesta al flujo para medir el intercambio térmico que se produce. La relación entre la velocidad del flujo y la tensión de salida es deducida sobre la base de las ecuaciones de transferencia de calor, tomando por referencia la potencia generada por la corriente eléctrica que pasa por el hilo. El sensor es calentado por una corriente eléctrica I y enfriado proporcionalmente, de acuerdo a la componente de la velocidad del aire que incide perpendicular al elemento sensible [11], ver figura 1.

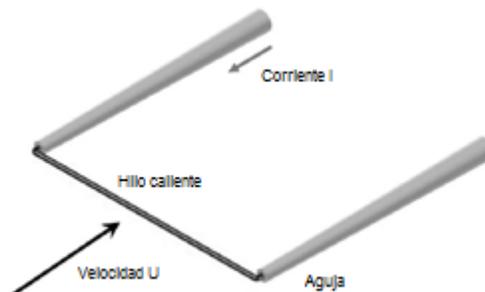


Figura 1: Transferencia de calor entre el sensor de hilo caliente y el flujo, Loureiro(2006) [11]

En un elemento sobrecalentado ocurren tres procesos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. El proceso de conducción se refiere a la transferencia de calor a través de un material sólido o de un flujo sin movimiento. La convección es la transferencia de calor que se establece por el movimiento del flujo o gas sobre un material caliente. La radiación es la transferencia de calor por la emisión de ondas electromagnéticas desde un material caliente [12]. Existen dos procesos de convección, la convección libre o natural y la convección forzada. La primera se presenta cuando en un flujo se crean gradientes de temperatura que provocan movimiento y, por tanto, transferencia de calor. La convección forzada ocurre cuando un flujo es obligado a moverse mediante un agente externo y por esta razón se produce transferencia de calor. En los sensores térmicos de flujo se manifiestan de forma general los tres procesos de transferencia de calor. Sin embargo, es común que el principio que predomine sea el de la convección térmica forzada, de forma que este proceso quede determinado por el movimiento del flujo [13].

Los sensores de flujo de aire por principio térmico pueden ser operados en diferentes modos, ellos se distinguen fundamentalmente por el método de control de la corriente eléctrica que pasa por el sensor [11]. Los más conocidos son los anemómetros a temperatura constante (CTA) y los anemómetros de corriente constante. En los anemómetros de hilo caliente de corriente constante, como su nombre lo dice, la corriente del puente es constante, permitiendo que la temperatura y la resistencia se alteren de acuerdo con el cambio de velocidad. Su ventaja es que presentan un circuito cerrado más simples y barato para su fabricación. Como se había mencionado anteriormente, el anemómetro de hilo caliente a temperatura constante (CTA) es el más utilizado en el campo del análisis experimental en fluidos y será el objeto de estudio de esta nota técnica.

Este trabajo tiene como objetivos describir las características del anemómetro de hilo caliente a temperatura constante que permiten la obtención de las características de las fluctuaciones de las velocidades de viento y ejemplificar la aplicación de CTA para obtención de velocidades en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones de la UFRGS.

ANEMÓMETRO A TEMPERATURA CONSTANTE (CTA)

PARTES COMPONENTES

La sonda del anemómetro está constituida por un elemento sensor y por un soporte que está conformado por un conjunto de dientes, ver figura 2. Los dientes, además de soportar el elemento sensor, conducen la corriente eléctrica hasta él. El elemento sensor tiene forma de filamento, por lo general de 5 μm de diámetro y 1,25 mm de longitud. El filamento o hilo puede estar constituido por varios materiales, los más utilizados son el tungsteno, platino o aleaciones de platino.

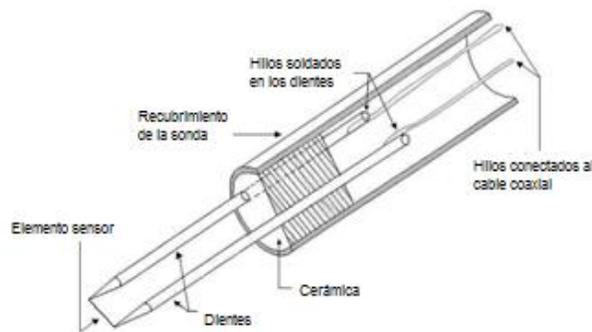


Fig. 2: Diseño esquemático de una sonda, Fuente: QUEIROZ(2006) [14]

Existe una gran variedad de anemómetros de CTA utilizados en diversas aplicaciones. Ellos se diferencian fundamentalmente por el número de elementos sensibles (número de hilos), por la posición de las agujas y por el tipo de material del hilo o el tipo de recubrimiento. Algunos ejemplos de sensores son mostrados en la figura 3, adaptada por Loureiro [11] de un catálogo de Dantec. Para la medición de la velocidad, el número de hilos generalmente corresponde a las componentes del vector velocidad que el sensor es capaz de medir.

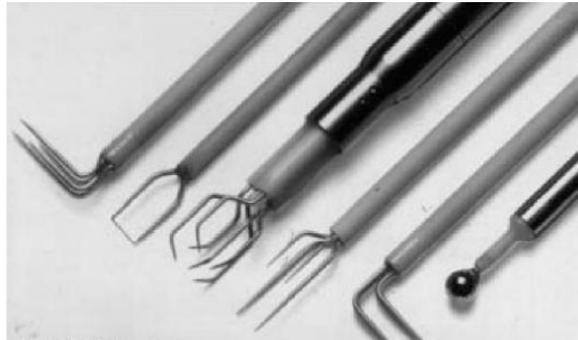


Fig. 3 Tipos de sensores de hilo caliente, Fuente: Loureiro(2006) [11].

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de los anemómetros a temperatura constante (CTA) está basado en que la corriente del sensor sufre variaciones de acuerdo con la velocidad del flujo, con el objetivo de mantener su resistencia a temperatura constante.

Estos anemómetros emplean un lazo de control que mantiene constante la diferencia de temperatura entre el elemento sobrecalentado y el flujo. La potencia que se consume para mantener el sensor sobrecalentado a una temperatura constante es proporcional a la velocidad del flujo de aire [15].

El instrumento es compuesto básicamente por un pequeño sensor y por un circuito controlador o de realimentación. Una corriente eléctrica controlada es impuesta a este filamento, y el calor generado por efecto Joule es expuesto al flujo. El circuito eléctrico más utilizado para evaluar las variaciones de la resistencia eléctrica es el llamado puente de Wheatstone [16], compuesto por cuatro resistencias eléctricas en forma de un cuadrilátero, siendo dos fijas, una de referencia y la otra es la resistencia del elemento sensor (R_w), ver figura 4.

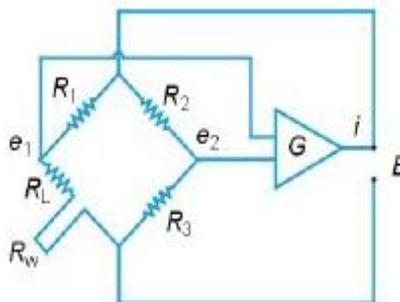


Fig. 4 Configuración circuital básica del método de operación CTA, Fuente: Jørgensen (2002) [17].

El puente de Wheatstone opera con una resistencia de sobrecalentamiento constante, cuyo valor es calculado por el propio puente. El circuito de retroalimentación es el responsable de producir la corriente necesaria para balancear el puente de Wheatstone a través de un aumento de la resistencia del sensor. Esto ocurre debido a que el filamento (hilo) posee un coeficiente térmico positivo de resistividad, lo que significa que cuando la temperatura del filamento varía lo mismo ocurre con el valor de su resistencia. En condiciones de operación el circuito de retroalimentación aplica una corriente eléctrica al puente de Wheatstone, y promueve así el aumento de la temperatura y de la resistencia del hilo caliente hasta un valor predeterminado, que por lo general es en torno de 250°C . En esa condición de equilibrio se dice que el puente está balanceado. Un pequeño aumento de la velocidad del fluido provoca el enfriamiento del sensor, disminuyendo su resistencia y consecuentemente desbalanceando el puente de Wheatstone. Eso hace que el circuito de retroalimentación aumente la corriente que alimenta al puente, calentando el sensor para llevar nuevamente el puente a la condición de equilibrio. Como la respuesta del circuito es muy rápida la temperatura del sensor permanece virtualmente constante durante la variación de la velocidad del flujo. Luego, la diferencia de tensión entre los extremos del puente es proporcional a la velocidad medida [11].

En la figura 5 se muestra el diagrama general del proceso de medición de la velocidad de un flujo utilizando el anemómetro de hilo caliente en el modo de operación de CTA. El desplazamiento del flujo al incidir sobre el filamento de la sonda, altera su

resistencia eléctrica, que como se había mencionado anteriormente esta resistencia es uno de las componentes del puente de Wheatstone. La diferencia de tensión de salida del puente es amplificada “K” veces, siendo este valor proporcional a la velocidad del flujo. El valor amplificado realimenta el puente de Wheatstone a través del amplificador de corriente “I” (servo amplificador), corrigiendo la temperatura del sensor por la variación de su corriente eléctrica con el objetivo de mantener constante el resto de los elementos del puente de Wheatstone [16]. Para permitir el valor de la manipulación digital de la velocidad del flujo, la señal que representa la variación de las tensiones de la corriente es convertida y almacenada en una computadora a través de un dispositivo de adquisición de datos (convertidor A/D: analógico a digital). Con los valores de la tensión de corriente digitalizados se obtiene una curva de calibración del anemómetro que relaciona la tensión de corriente (E) con la velocidad del flujo (U). Finalmente a partir de la serie temporal obtenida que muestra los valores de la velocidad en función del tiempo, se realiza el análisis de los datos donde se obtienen las características estadísticas de la señal, así como sus espectros.

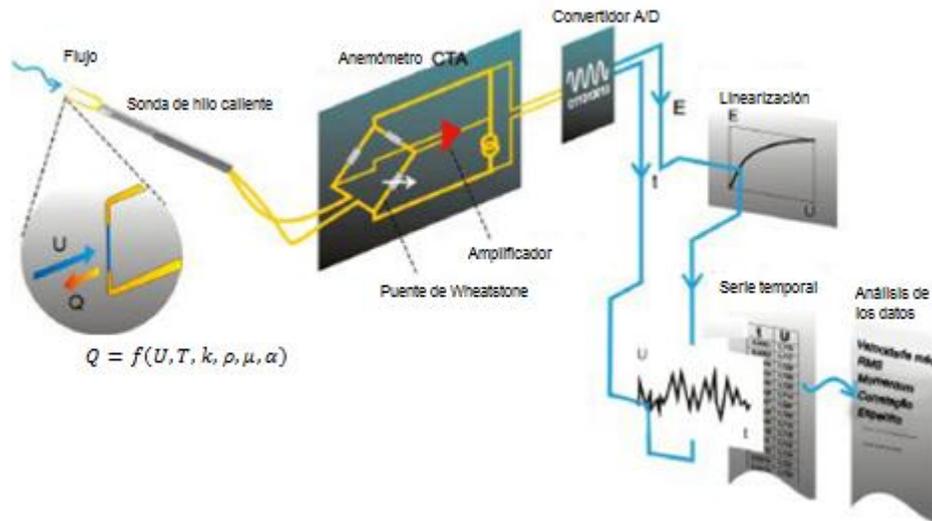


Fig. 5 Diseño básico de sistema eléctrico de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante (CTA), Fuente: Dantec Dynamics(2012) [18].

ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

La adquisición de la tensión de salida del anemómetro de hilo caliente es un paso determinante en la medición y muy importante para el futuro tratamiento de los datos. La tensión de salida es una señal continua y analógica. Para poder trabajar con la señal digital es necesario realizar inicialmente el muestreo, es decir, adquirir una serie temporal de los valores de la señal original a través de una placa de conversión de analógico a digital (A/D). Los parámetros que definen la adquisición de datos de una placa A/D son: a) tasa de muestreo, “ f_a ”, determina intervalo de tiempo en el cuál las muestras consecutivas de la señal analógica serán adquiridas; b) número de muestras, “ N_a ”, determina el número de puntos de la serie temporal. Estos dos parámetros determinan el tiempo de adquisición, “ t_a ”, necesario para digitalizar la serie temporal. La relación entre estos parámetros está dada por la ecuación 1:

$$\Delta t_a = \frac{N_a}{f_a} \quad (1)$$

El convertidor análogo-digital discretiza la señal en pequeños intervalos. El número de intervalos es definido por el número de bits de la placa de adquisición. Otro elemento importante en la preparación de la señal digital de salida son los filtros. Los filtros son utilizados para eliminar los ruidos o analizar determinados rangos de frecuencias que sean de interés. Los diferentes tipos de filtros son: pasa bajos, pasa altas, pasa banda y supresor de banda.

Luego de obtener los datos de la señal de salida es necesario realizar el proceso de calibración y determinar de la forma más precisa posible, la relación entre la tensión de salida del anemómetro y las propiedades físicas de interés, en este caso la velocidad y la temperatura.

Para obtener los datos de velocidad, a partir de la correcta curva de calibración, es necesario: 1) realizar la corrección por temperatura, 2) obtener la curva de calibración entre la tensión de salida y la velocidad del flujo, 3) descomposición del vector velocidad en componentes.

CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

La temperatura del fluido varía con el tiempo y con el espacio, estos cambios de temperatura pueden ser lentos o bruscos, pero en todos los casos, la señal de salida del anemómetro de hilo caliente es influenciada por la variación de la temperatura. Por tanto, se hace necesario la medición del campo de velocidades y de temperatura simultáneamente [11].

Al variar la temperatura del momento de calibración al momento de la medición, Bearman [19] citado por Jørgensen[17], propone la siguiente expresión para realizar la corrección a la tensión de salida por temperatura:

$$E_{corr} = E \left(\frac{T_w - T_0}{T_w - T_a} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Donde:

T_w : temperatura del sensor de hilo caliente sensor

T_0 : temperatura ambiente de referencia en relación con el último recalentamiento antes de la calibración.

T_a : temperatura ambiente durante la adquisición

CALIBRACIÓN

Para establecer las leyes de calibración es necesario conocer cuál es el comportamiento de transferencia de calor entre el sensor y el flujo a su alrededor. Según Loureiro [11] este comportamiento está determinado por la ecuación 3:

$$I^2 R_F = h l \pi d (T_F - T_a) \quad (3)$$

Donde:

I : corriente eléctrica que pasa por el sensor

h : coeficiente de transferencia eléctrica por convección

d : diámetro del hilo

l : longitud del hilo

T_F : temperatura del hilo caliente

T_a : temperatura ambiente durante la adquisición

R_F : resistencia del hilo

Esta ecuación muestra que la potencia eléctrica disipada en el hilo es función del coeficiente de transferencia de calor por convección y de la diferencia de temperatura entre el hilo y el fluido.

Conociendo la ecuación anterior es necesario determinar la relación entre la tensión en el hilo y la velocidad del flujo. Según Loureiro[11] existen una gran variedad de leyes de calibración, pero la más conocida y de mayor aplicación es la Ley de King (1914) que se muestra a través de la función exponencial de la ecuación 4:

$$E^2 = A + BU^n \quad (4)$$

Donde E es la tensión de salida del anemómetro, U es la velocidad del flujo y las constantes A y B deben ser determinadas a través de un procedimiento de calibración. King recomendó el uso de $n = 0,45$.

Según Jørgensen [17] la expresión anterior también puede ser escrita como una función polinomial a partir de la ecuación 5, donde el valor de tensión de salida que debe ser utilizado es el corregido por la variación de temperatura, es decir, es el " E_{corr} " mostrado en la ecuación 2.

$$U = C_0 + C_1 E_{corr} + C_2 E_{corr}^2 + C_3 E_{corr}^3 + C_4 E_{corr}^4 + C_5 E_{corr}^5 \quad (5)$$

La curva de calibración que se obtendría sería como la mostrada en la figura 6.

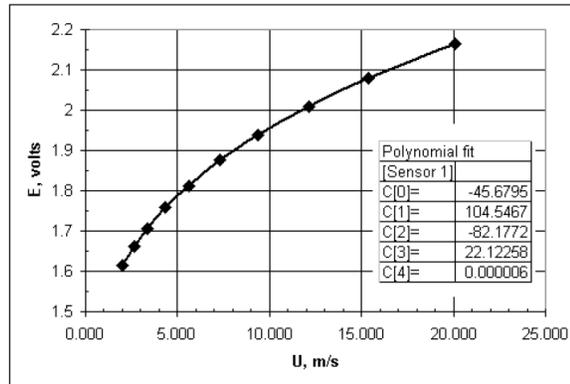


Fig. 6 Curva de calibración de tensión con respecto a la velocidad, Fuente: Jørgensen (2002)[17]

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD

Una gran ventaja de la anemometría por hilo caliente es permitir la discriminación de las componentes de la velocidad. La obtención del vector velocidad se alcanza a través de dos pasos fundamentales: a) descomposición del vector velocidad en una componente normal, una tangencial y otra componente transversal (binormal) al sensor de hilo caliente, y b) análisis de la sensibilidad de hilo caliente para cada una de esas componentes [11].

Para entender como un hilo caliente cilíndrico puede distinguir las componentes de la velocidad, se analiza primeramente un flujo bidimensional, con el vector velocidad U en el plano de las agujas xy , ver figura 7. El vector U se descompone en una componente normal, U_N , al hilo caliente y en una componente tangencial o paralela al hilo, U_T . Sin embargo, aunque ambas inciden simultáneamente sobre el sensor, la principal responsable por el enfriamiento del hilo es la componente normal U_N . Bajo estas condiciones, el ángulo formado entre el vector velocidad y la normal al sensor (dirección x) en el plano de las agujas es el llamado ángulo de “guinada”.

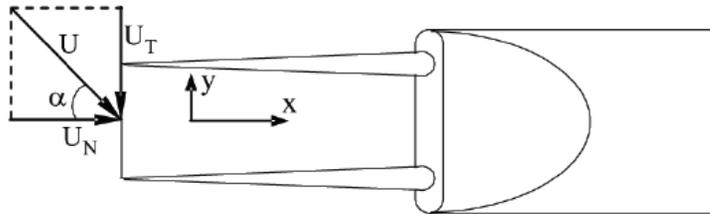


Fig. 7 Sensibilidad direccional: ángulo de “guinada” α para un hilo caliente de un canal. Fuente: Adaptado de Lomas (1986)[20] por Loureiro(2006)[11].

El sensor de hilo caliente también es sensible a las variaciones de la velocidad en la dirección normal al plano de las agujas xy . Este aspecto es considerado a través del llamado ángulo de ataque, que es definido como el ángulo entre el vector velocidad en el plano xz y la dirección x , ver figura 8.

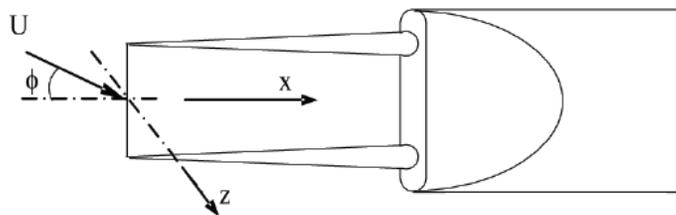


Fig. 8 Sensibilidad direccional: ángulo de inclinación (ϕ) con relación al plano de las agujas para un hilo caliente de un canal. Fuente: Adaptado de Lomas (1986)[20] por Loureiro(2006)[11].

Por tanto, la velocidad efectiva vista por el sensor tendrá las contribuciones de las tres componentes de la velocidad, esto es expresado a partir de la ecuación 6 [11].

$$V_e^2 = (U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2) \quad (6)$$

Donde V_e es la velocidad efectiva, U_B es la componente binormal de la velocidad en la dirección z , U_N componente normal y U_T componente tangencial. Los parámetros k y h son conocidos como coeficientes de “guinada” y de ataque, y representan la sensibilidad del sensor con respecto a esos ángulos.

APLICACIÓN DE CTA EN TÚNEL DE VIENTO

El anemómetro de hilo caliente a temperatura constante fue utilizado para obtener las características de la velocidad del viento en el Túnel de Viento “Prof. Joaquim Blessmann” del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones (LAC) de la Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFRGS), mostrado en la figura 9. Se trata de un túnel de circuito cerrado, proyectado específicamente para desarrollar estudios de efectos estáticos y dinámicos sobre modelos de construcciones civiles en general. Este túnel permite la simulación de las principales características de los vientos naturales. Su cámara principal de ensayos tiene una relación longitud/altura de 10,3 y las dimensiones que presentan son 1,3 metros de ancho, 0,9 metros de altura y 9,32 metros de longitud. La velocidad máxima de flujo de aire en él, con viento uniforme y suave, sin modelos es de 42 m/s. Las hélices del ventilador son accionadas por un motor eléctrico de 100HP y la velocidad del flujo es controlada a través de aletas radiales que obstruyen el paso del aire.



Fig. 9 Túnel de Viento “Prof. Joaquim Blessmann”

El Túnel de Viento “Profesor Joaquim Blessmann” dispone de cuatro mesas giratorias para la fijación de los modelos, tanto para ensayos estáticos como dinámicos, ver figura 10. Cada mesa tiene sus aplicaciones específicas. Las características de viento que se mostrarán en este trabajo corresponden a la mesa 2.

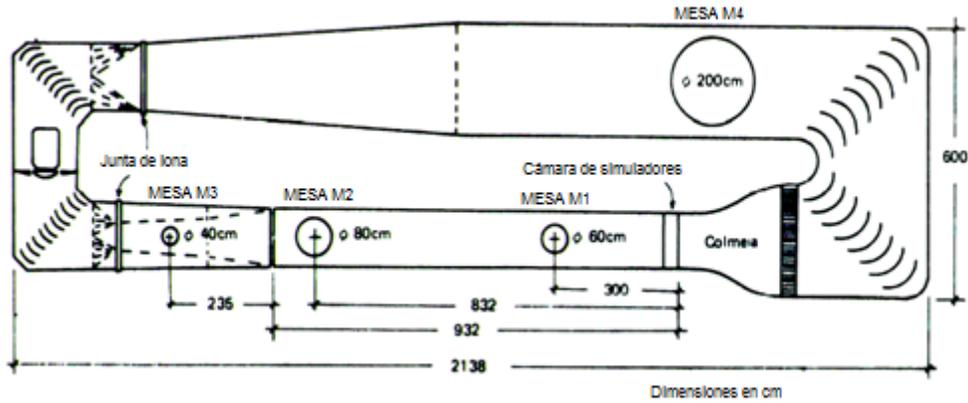


Fig. 10 Circuito Aerodinámico del Túnel de Viento Prof. Joaquim Blessmann

La simulación de la capa límite atmosférica se realizó para dos perfiles de velocidades medias diferentes. En la capa límite atmosférica la velocidad media de viento varía desde cero, junto a la superficie, hasta la velocidad de gradiente U_{ZG} , en la altura de gradiente Z_G , que es función de la rugosidad del terreno. Cuanto mayor es la rugosidad superficial, mayor será la agitación mecánica provocada por el aire, mayor el intercambio turbulento de cantidad de movimiento y por tanto mayor la altura de gradiente [21]. La velocidad del viento sin obstrucción se denomina velocidad de gradiente del viento, U_{ZG} y se considera constante por encima de la altura de gradiente [22]. La variación vertical de la velocidad media del viento, $U(z)$, puede ser representada por una relación logarítmica o por una ley potencial. La ley potencial es usada por algunos ingenieros [22], es una ecuación empírica que para el caso de velocidades medias se expresa como la ecuación 7 :

$$U(z) = U_{ZG} \left(\frac{z}{Z_G} \right)^p \quad (7)$$

Se simularon dos perfiles de velocidad media, uno corresponde a un terreno con muy baja rugosidad (zona de barro o mar) y otro a un terreno muy rugoso (centro urbano), donde los exponentes de la ley potencial son 0,11 y 0,34 respectivamente.

Para lograr la simulación del perfil de velocidad con exponente $p=0,11$ en el túnel de viento, se utilizaron como dispositivos los triángulos mostrados en la figura 11 a); en el caso del perfil con exponente 0,34 se utilizaron los triángulos, la barrera y bloques colocados en el piso del túnel [23], como se muestra en la figura 11 b).



a)



b)

Fig. 11 Dispositivo de generación de perfil de velocidad, a) $p=0,11$, b) $p=0,34$. Fuente: Loredo-Souza, Schettini et al. (2004) [23].

El tipo de sonda de anemómetro de hilo caliente utilizado para la obtención de velocidades fue el 55P11 [18] . Esta sonda es la más sencilla ya que sólo tiene un elemento sensor, con ella se puede medir a la vez, sólo uno de los componentes del vector de velocidad y su fluctuación. Para la obtención de las velocidades a diferentes alturas dentro del túnel se colocó la sonda del anemómetro en un soporte y se varió la altura con un coordinómetro (*transverse system*), como se muestra en la figura 12.



Fig. 12 Colocación de sonda del CTA dentro del túnel de viento

En la figura 13 se muestran los instrumentos y equipos utilizados para la medición y adquisición de los datos de las velocidades en el túnel de viento utilizando CTA.

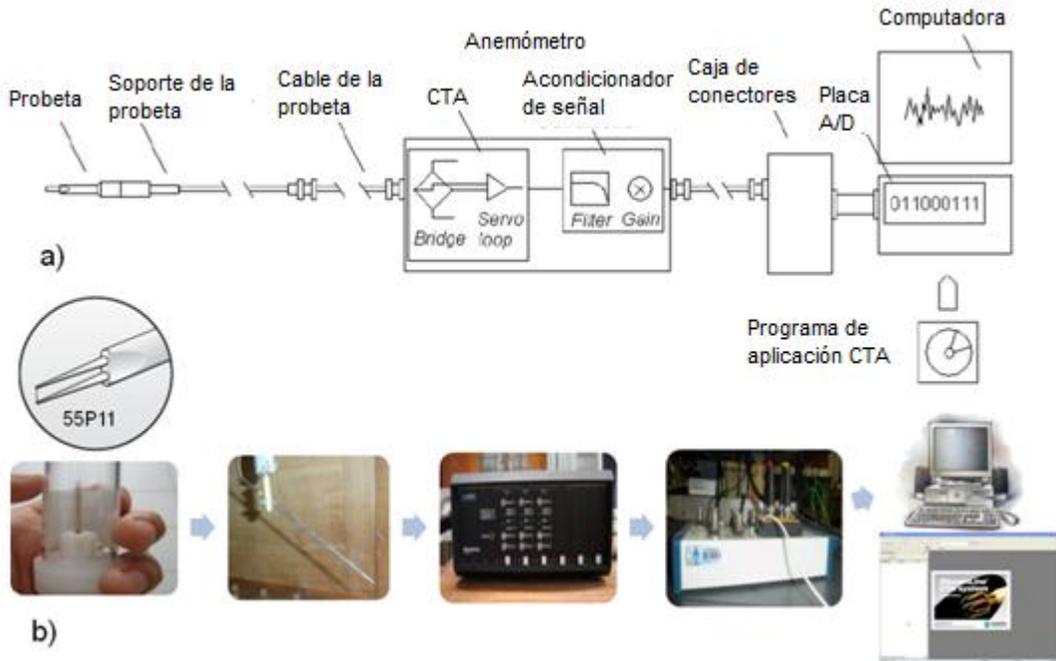


Fig. 13 Instrumentos y equipos que componen el sistema de obtención y adquisición de datos del CTA. a) Representación Esquemática, Fuente: Fuente: Jørgensen (2002)[17],b) Fotos del equipamiento, Fuente: LAC,UFRGS.

Para la adquisición de los datos se utilizó una placa de 16 bits, obteniéndose un número de muestras de 65536. La frecuencia de adquisición fue de 2 KHz y el tiempo total de adquisición fue de 32,7 s. Se utilizó un filtro pasa bajo con frecuencia de corte de 30 Hz.

Para la calibración y tratamiento de los datos se utiliza el software “StreamLine CTA System” proporcionado por Dantec Dynamics. Fue realizada la corrección por temperatura. Los valores de los coeficientes del polinomio que conforman la curva de calibración entre la tensión de salida y la velocidad en el túnel son: $C_0=65.9068$, $C_1=-140.885$, $C_2=116.855$, $C_3=-46.6372$ y $C_4=7.93742$.

La figura 14 muestra a modo de ejemplo las mediciones de velocidades en función del tiempo para la altura media del túnel correspondiente a la simulación del terreno de baja rugosidad de exponente igual a 0,11 la cual fue obtenida a partir de la utilización del anemómetro de hilo caliente.

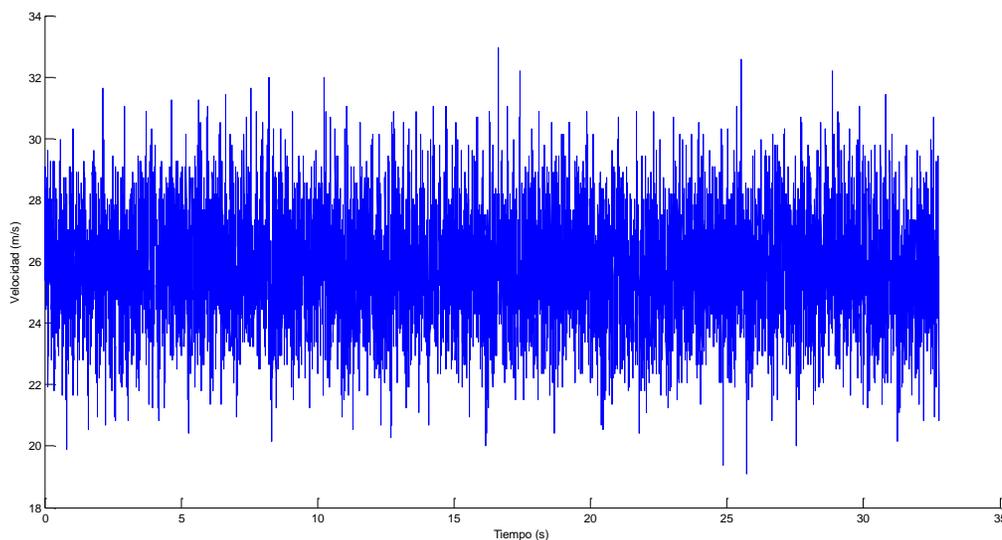


Fig. 14 Serie de las mediciones de velocidad del viento para la altura media del túnel (450 mm).

Los puntos en el gráfico de la figura 15 representan los valores de velocidad media obtenidos experimentalmente y las líneas representan su ajuste a una curva tipo potencial. Se puede observar como la mayoría de los valores experimentales se ajustan a la ley potencial para ambos tipos de terreno. En el gráfico se observa que el tipo de terreno con exponente de la ley potencial igual a 0,34 presenta mayor gradiente de velocidad que el tipo de terreno con exponente igual a 0,11, este hecho está dado porque la rugosidad del primero es mucho mayor lo cual incrementa las variaciones en los valores de la velocidad a medida que aumenta la altura.

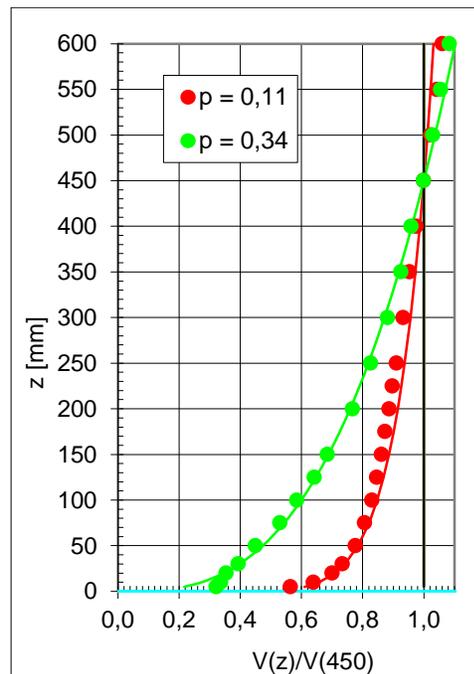


Fig. 15 Perfil de Velocidades medias para terreno con exponente p=0,11 y p = 0,34

La caracterización de las fluctuaciones de la velocidad del viento fue realizada a partir de obtener los valores de intensidad de turbulencia longitudinal y la escala longitudinal de la turbulencia para las diferentes alturas donde fueron realizadas las mediciones, ver figura 16. La intensidad de turbulencia es la energía total de las fluctuaciones del viento, es expresada como la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad normalizada por la velocidad media del viento, ver ecuación 8. La escala longitudinal es una medida del tamaño de los vórtices, puede ser estimada por la integración de las funciones de correlación cruzada de la velocidad.

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} = \frac{\sqrt{v'^2}}{U} \quad (8)$$

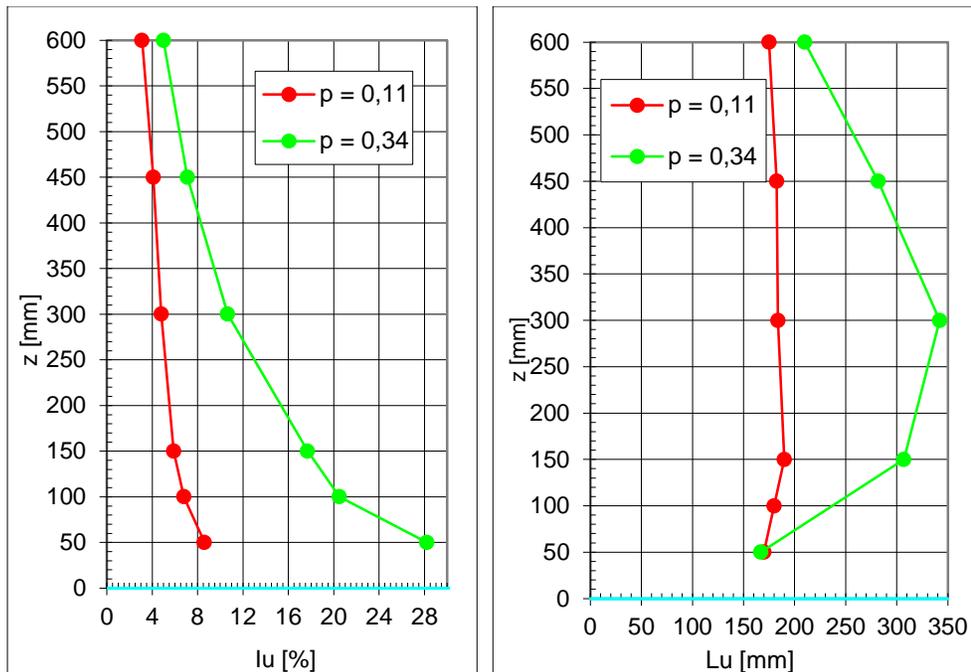


Fig. 16 a) Intensidad de la componente longitudinal de la turbulencia, b) Escala longitudinal de la turbulencia.

El gráfico anterior muestra que el tipo de terreno liso o de muy baja rugosidad ($p=0,11$) presenta bajos valores de intensidad de turbulencia y son aproximadamente constantes a medida que aumenta la altura, sin embargo para el tipo de terreno con $p=0,34$ se observan altos valores de intensidad de turbulencia y estos van disminuyendo a medida que aumenta la altura, lo cual es un resultado lógico debido a las diferencias en las rugosidades que modifican significativamente las características de las fluctuaciones de la velocidad. En cuanto a la escala longitudinal de la turbulencia los resultados son similares, ya que para el tipo de terreno con exponente $p=0,11$ la medida del tamaño de los vórtices permanece aproximadamente constante para toda la altura, sin embargo para el tipo de terreno con exponente $p=0,34$ la medida del tamaño de los vórtices varía con la altura.

CONCLUSIONES

Este trabajo describe las características de los anemómetros de hilo caliente cuyo principio de funcionamiento es a temperatura constante (CTA). Este tipo de medidor de velocidad de aire, es el más utilizado en túneles de viento para mediciones de las fluctuaciones de la velocidad del viento. Como ejemplo de aplicación se muestran mediciones realizadas en el túnel de viento "Prof. Joaquim Blessmann" del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones (LAC) de la Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFRGS), utilizando la sonda de anemómetro de hilo caliente 55P11 para la obtención del perfil de velocidades, intensidad de la turbulencia y escala longitudinal de la turbulencia.

Este material constituye un apoyo para estudiantes y profesionales que necesiten utilizar los anemómetros de hilo caliente para la obtención de las características de las fluctuaciones de las velocidades de viento en un túnel de viento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta nota técnica agradecen el financiamiento proporcionado por CAPES, Fundación de Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior, Brasil, que hicieron posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Avelar, A.C., et al., *Aplicações de turbulência na indústria aeronáutica- técnicas experimentais*, in *Turbulência.8a Escola de Primavera de Transição e Turbulência*, B.C. Souza, et al., Editors. Septiembre,2012, ABCM, Escola Politécnica da Universidade de Sao Pablo: Sao Pablo.
2. Surry, D. *Cosequences of distortion in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence*. in *Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications*. april 1982. Gaithersburg, Maryland, USA,; Cambridge University Press.
3. Balendra, T., et al., *Evaluation of flow characteristics in the NUS-HDB Wind Tunnel*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002. 90(6): p. 675-688.
4. Blessmann, J., *The boundary layer tv-2 wind tunnel of the UFRGS*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1982. 10(2): p. 231-248.
5. Cook, N.J., *A boundary layer wind tunnel for building aerodynamics*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1975. 1(0): p. 3-12.
6. Davenport, A.G. and N. Isymov. *The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading*. in *Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures*. 1967. Ottawa, Canada.
7. Kozmar, H. *Natural wind simulation in the TUM boundary layer wind tunnel* in *EUROPEAN & AFRICAN CONFERENCES ON WIND ENGINEERING (EACWE) 5*. 2009. Florency,Italy.
8. Okamoto, S., ed. *WIND TUNNELS*. 2011, InTech: Rijeka, Croatia.
9. Wittwer, A.R. and S.V. Moller, *Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000. 84(3): p. 307-320.
10. Chun, S., *Air Speed Measurement Standards Using Wind Tunnels*, in *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*, J. Colman Lerner and U. Boldes, Editors. 2011, InTech: Croatia. p. 709.
11. Loureiro, J.B.R. and J.L. da Silva Neto, *Princípios de anemometria térmica*, in *Turbulência,5a Escola de Primavera em Transição e Turbulência*, A.P. Silva Freire, A. Ilha, and R. Breidenthal, Editors. 2006, ABCM, COPPE/UFRJ, IME Rio de Janeiro.
12. ASHRAE, *Handbook Fundamentals*. 1997.
13. Martín Rodríguez, E., *Simulación de un prototipo de sensor de flujo de aire de principio térmico mediante la herramienta ANSYS FEM*, in *Centro de Investigaciones en Microelectrónica*. 2007, ISPJAE: La Habana.
14. QUEIROZ, M.C., *Análise do Escoamento em uma Estação de Calibração de Tubos de Pitot Usando as Técnicas de Pitometria e Anemometria Térmica.*, in *Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais*. 2006: Belo Horizonte.
15. León, I., et al. . *Constant temperature anemometer with duty-cycle output conversion*. in *Proc. Workshop IBERCHIP*. Marzo 2003. Habana.
16. Barbosa Soares, C., *Estudo experimental do comportamento fluidodinâmico na seção de testes de um túnel de vento para baixas velocidades*, in *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,IPUC - Instituto Politécnico*. 2008, Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais: Belo Horizonte.
17. Jørgensen, F.E., *How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide*, D. Dynamics, Editor. 2002.
18. Dantec Dynamics-www.dantecdynamics.com. *Constant Temperature Anemometry*. [cited consulta realizada octubre 2012].
19. Bearman, P.W., *Corrections for the Effect of Ambient temperature Drift on Hot-Wire Measurements in Incompressible Flows*. DISA Information No. 11, 1971.
20. Lomas, C.G., *Fundamentals of Hot Wire Anemometry*, ed. C.U. Press. 1986., Cambridge.
21. Blessmann, J., *O vento na engenharia estrutural*. 1995: Ed. Universidade UFRGS.
22. Stathopoulos, T. and C.C. Baniotopoulos, eds. *Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures*. CISM Courses and Lectures -No.493 International Centre for Mechanical Sciences. 2007, SpringerWien New York.
23. Loredou-Souza, A.M., E.B.C. Schettini, and M.J. Paluch, *Simulação da camada atmosférica em túnel de vento*. , in *Turbulência. 4ta Escola de Primavera de Transição e Turbulência*, V.S. Moller and J.H. Silvestrini, Editors. 2004, ABCM: Porto Alegre.

AUTORES

Patricia Martín Rodríguez: Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, email: patriciamr@civil.cujae.edu.cu

Eduardo Martín Rodríguez: Centro de Investigaciones de Microelectrónica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, email: eduardo.martin@electronica.cujae.edu.cu

Acir Mércio Loredo-Souza: Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, acir@ufrgs.br

Edith Beatriz Camano Schettini: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, bcamano@iph.ufrgs.br