

CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO DE OBSTRUCCIONES EN EL ÁREA TRANSVERSAL DE UN TÚNEL DE VIENTO SOBRE LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE ANEMÓMETROS

QUANTIFICATION OF OBSTRUCTIONS' EFFECT IN THE TRANSVERSAL AREA OF A WIND TUNNEL ON THE CALIBRATION RESULTS OF ANEMOMETERS

Carolina Madolet Pinto^{*}
Edison Gerardo Granados Avellaneda^{**}
Carlos Eduardo García Sánchez^{***}

Fecha de recepción: 13 de junio de 2017
Fecha de revisión: 8 de mayo de 2018
Fecha de aprobación: 15 de mayo de 2018

Cómo citar: C. Madolet Pinto, E. G. Granados Avellaneda, C. E. García Sánchez, "Cuantificación del efecto de obstrucciones en el área transversal de un túnel de viento sobre los resultados de la calibración de anemómetros", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 28, no. 2, pp. 105-120. DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.2904>

RESUMEN

Los instrumentos utilizados para cuantificar magnitudes físicas requieren de calibraciones periódicas para garantizar la fiabilidad y precisión de sus mediciones. Uno de los métodos de calibración de anemómetros más utilizado consiste en la comparación directa de las lecturas obtenidas por el anemómetro que se desea calibrar y por un instrumento patrón, al exponer ambos instrumentos a un gas a la misma velocidad en el interior de un túnel de

* Egresada de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: caromadoletiq@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0295-3556>

** Egresado de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: edison9203@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9459-2152>

*** Líder del Área de Investigación, Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas). CDT de Gas. Correo electrónico: cgarcia@cdtdegas.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1543-1498>

viento. Sin embargo, la presencia del anemómetro que está siendo calibrado genera una obstrucción que puede distorsionar el perfil de velocidad al interior del túnel de viento; por esta razón, la presente investigación tuvo como objetivo estudiar y modelar el efecto de las obstrucciones causadas por los anemómetros bajo prueba sobre los perfiles de velocidad al interior del túnel de viento WSL20, de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, y así evaluar su influencia sobre los procesos de calibración de instrumentos. Los resultados muestran que el tubo de Pitot tipo L no causa una distorsión significativa en el perfil de velocidad, mientras que anemómetros rotativos de diferentes dimensiones ocasionan incrementos en la velocidad registrada por el patrón que varían entre 2,5 % y 5,6 %. Se evidencia la importancia de considerar el efecto de las obstrucciones al interior del túnel de viento y de cuantificar el sesgo que ocasionan, para evitar que este hecho se convierta en un error sistemático dentro del proceso de calibración.

Palabras Clave: calibración de anemómetros, medidores de velocidad de gases, perfil de velocidad, túnel de viento.

ABSTRACT

The instruments used to calculate physical quantities require periodic calibrations to ensure the reliability and accuracy of their measurements. One of the most widely used anemometer calibration methods is to directly compare the readings obtained by the anemometer to be calibrated and a standard instrument by exposing both to a gas at the same speed within a wind tunnel. However, the presence of the anemometer being calibrated creates an obstruction that can distort the velocity profile inside the wind tunnel. Therefore, the objective of this research was to study and model the effect of obstructions caused by anemometers being tested on velocity profiles inside wind tunnel WSL 20 of the Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas and, thus, evaluate their influence on instrument calibration. The results show that type L Pitot tubes do not cause a significant distortion of the velocity profile, whereas vane anemometers of different dimensions increase the speed recorded by the standard tool, which varied between 2.5 and 5.6 %. Considering the effect of obstructions inside the wind tunnel and quantifying the bias caused by them is relevant to avoid a systematic error in the calibration process.



Keywords: anemometer calibration; gas velocity meters; velocity profile; wind tunnel.

INTRODUCCIÓN

La velocidad de gases es una magnitud importante en diversos sectores de aplicación, incluyendo el monitoreo y control de emisiones atmosféricas, la aerodinámica, los sistemas de refrigeración, la meteorología, la construcción, la evaluación del potencial eólico y distintos procesos industriales, incluyendo los biomédicos, químicos, farmacéuticos y de semiconductores [1], [2]. Existe una gran variedad de instrumentos para medir la velocidad de gases, que difieren en tamaño, geometría, nivel de precisión, intervalo de medida, condiciones de medición y principio de operación. Entre los tipos de instrumentos de medición de velocidad de aire más utilizados se encuentran los tubos Pitot de tipo estático, los anemómetros ultrasónicos, los anemómetros térmicos o de hilo caliente, los anemómetros de copas y los anemómetros de hélices [3]–[5].

Es importante garantizar la fiabilidad y precisión de las mediciones de velocidad de gas. Para ello, los equipos de medición deben someterse a diversas actividades de mantenimiento y aseguramiento metrológico, y entre estas últimas se incluye la evaluación periódica del desempeño de los anemómetros por medio de calibraciones [6]. El problema de la calibración de anemómetros ha cobrado mayor interés en la medida en que las industrias y las agencias ambientales han estado definiendo requisitos para la obtención de mediciones más precisas de velocidad de fluidos, tanto en ambientes artificiales como en naturales [7], y también como consecuencia de

los avances tecnológicos en los instrumentos de medición de velocidad de aire [8]. Los métodos de calibración pueden clasificarse en dos grandes grupos: directos e indirectos [9]. El método de comparación directa es el proceso más utilizado para la calibración de velocidad de gases, donde el *Master Meter* (MM - instrumento de referencia o patrón) y el *Meter Under Test* (MUT - instrumento bajo prueba o que se está calibrando) se exponen a un mismo flujo de aire, que posea una velocidad estable y homogénea sobre el área efectiva donde se llevará a cabo la medición [1]. Una manera de lograr la estabilidad y homogeneidad requerida por la calibración por comparación directa, consiste en la utilización de un túnel de viento especializado que posea un perfil de velocidad uniforme y una limitada turbulencia, con sistemas de control muy precisos para la generación del flujo [2], [10].

Un túnel de viento es una instalación diseñada para producir una corriente estable y controlada de aire, con dos posibles propósitos: (1.) determinar experimentalmente el efecto de flujo sobre modelos de edificaciones, paisajes urbanos, autos, aviones y otros objetos, y la dispersión de sustancias, entre otras aplicaciones de modelado, y (2.) la calibración de medidores de velocidad de aire [11], [12]. Los túneles de viento para aplicaciones metrológicas (de calibración, en este caso) requieren una muy buena caracterización del perfil de velocidad en la sección de prueba. Por ejemplo, algunos túneles incluyen toberas críticas corriente abajo de la sección de prueba para lograr una alta estabilidad en el flujo, y la caracterización se basa en el conocimiento de la relación entre la velocidad promedio en la sección de

prueba y una velocidad puntual en la misma región [13].

Actualmente, es posible medir velocidades en túneles de viento con incertidumbres entre 0,1 % y 10 %, dependiendo del patrón de referencia y del intervalo de medición [14]. Como patrones de calibración y de verificación, los más usados por los laboratorios son los anemómetros láser Doppler (LDA), los tubos de Pitot y los anemómetros térmicos [3]. Un LDA mide la velocidad del aire por medio de la determinación de la velocidad de una partícula en la intersección de dos rayos láser; por esto, requiere de la adición de pequeñas partículas de agua en la corriente de aire para su medición [15]. El tubo de Pitot permite determinar la velocidad del gas por medio de la medición de la presión total de la corriente y de su presión estática, y usando la ecuación de Bernoulli [16]. El anemómetro térmico determina la velocidad del fluido midiendo la transferencia de calor desde un alambre calentado eléctricamente o un sensor de película, inmerso en el fluido [3]. Independientemente de los patrones, para garantizar la comparabilidad entre las mediciones realizadas en diferentes naciones, es importante determinar el grado de equivalencia entre los patrones nacionales con que los distintos países realizan las unidades de las varias magnitudes físicas medibles [17].

Comúnmente, los procesos industriales que involucran el uso de anemómetros para medir la velocidad de distintos gases se usan para prever caudales que son determinantes en la eficiencia y seguridad de dichos procesos, por lo cual la industria requiere mediciones fiables y precisas. Esto implica que se requiere una mejora continua de los métodos de calibración en túneles de viento, los cuales son materia de estudio en distintos institutos y laboratorios alrededor del mundo [18].

A pesar de que el túnel de viento se construya y opere adecuadamente, existen factores que alteran el perfil de velocidad durante su operación, de modo que es necesario determinar el efecto de estos factores sobre el resultado del proceso de calibración. Entre los estudios aplicados a túneles de viento metrológicos se encuentran: la evaluación de la capa límite (una región cercana a la superficie en la cual el comportamiento del perfil de velocidad es diferente, con un gradiente de velocidad mayor) en el túnel; la alteración de la velocidad promedio de flujo como función de la posición en la dirección del flujo de la corriente; la disminución de la incertidumbre de calibración utilizando el túnel; la evaluación del efecto de modificaciones geométricas en el túnel; y la caracterización de perfiles de velocidad en diferentes posiciones del túnel [8], [10], [19], [20]. En general, la calibración de medidores de velocidad en túneles de viento está limitada por la ineficiencia de la ecuación de Bernoulli a bajas velocidades, lo que ocasiona un incremento notable de la incertidumbre en los rangos bajos de velocidad [2].

La anemometría en túneles de viento se enfrenta a dos desafíos principalmente: primero, es muy poco probable que la velocidad en el punto de medición sea igual a la velocidad promedio en el ducto, y segundo, el hecho de que el anemómetro bajo prueba (MUT) afecte la forma del perfil de velocidad, hace necesaria la cuantificación y posterior aplicación de una corrección por bloqueo, debido a la obstrucción [17]. El efecto de bloqueo tiene, además, un efecto significativo sobre la incertidumbre del proceso de calibración [2]. Entre las alternativas para cuantificar la corrección por bloqueo se encuentran el uso de CFD, la determinación del perfil de velocidad por medio de mediciones de velocidad en la sección circundante,

y la determinación de la permeabilidad del anemómetro [17]. En los túneles de viento para metrología más avanzados, se han reportado correcciones por bloqueo del orden de 0,9 % para anemómetros de paletas, y del orden de 0,1 % para anemómetros ultrasónicos [17]. Otros túneles para calibración de menor nivel metrológico reportan relaciones de bloqueo de alrededor de 3 % para los anemómetros de mayor tamaño [2].

Los estudios sobre el impacto en la calibración de instrumentos y las distorsiones que se puedan presentar en los perfiles de velocidad generados por el tamaño de los medidores, deben ser ejecutados específicamente para cada túnel de viento en sus condiciones de operación [21]. Con base en lo expuesto, el presente trabajo de investigación se enfocó en el estudio y modelado del perfil de velocidad del aire al interior del túnel de viento WSL20, desarrollado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas), tanto en ausencia como en presencia de diferentes anemómetros en el papel de MUT. La comparación se realizó primero por medio de una simulación, y posteriormente

de manera experimental; en ambos casos, el análisis se realizó considerando 4 diferentes velocidades de aire en el túnel. La experimentación se hizo midiendo la velocidad del gas en diferentes posiciones radiales de la sección de prueba (donde se ubica el MM), comparando el caso en que no se introduce un MUT en el túnel de viento contra la situación en que está presente el MUT.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Materiales

El WSL20 es un túnel de viento para aplicaciones metrológicas, el primero de su tipo en el país y el único desarrollado en Colombia. Posee capacidad para generar flujos de aire entre 0 m/s y 20 m/s, aunque el rango de calibración para velocidad de aire en el cual se acreditó el servicio de acuerdo a la norma ISO 17025 está entre 2 m/s y 20 m/s. El flujo en el túnel se genera por medio de 7 ventiladores axiales, y se controla por medio de un potenciómetro lineal. La figura 1 presenta un esquema del túnel WSL20,



Figura 1. Secciones del túnel de viento WSL20.

Fuente: documentación interna del túnel WSL20, CDT de Gas.



Figura. 2. Túnel de viento WSL20 del CDT de Gas.

Fuente: documentación interna del túnel WSL20, CDT de Gas.

y la figura 2 muestra una foto del mismo. Mayor información sobre el túnel puede encontrarse en [1].

El MM usado en el túnel WSL20 es un anemómetro térmico de temperatura constante (CTA). Se seleccionaron instrumentos de diferentes dimensiones como MUT, para evaluar la distorsión debida a la obstrucción del área transversal en el túnel, al incluirse en un proceso de calibración, y determinar si es posible encontrar una relación entre el área obstruida y la distorsión ocasionada. Los MUT usados fueron un tubo de Pitot tipo L, un anemómetro rotativo Kestrel Pocket Weather Meter 4000 (Kestrel), y un termohigroanemómetro (THA). La figura 3 presenta el MM usado y los 3 MUT utilizados en el estudio.

1.2 Métodos

Inicialmente, se realizó una simulación en soft-

ware CFD (Computational Fluid Dynamics) para visualizar la distorsión en los perfiles de velocidad ocasionada por la introducción de los diferentes MUT usados en el estudio. El diseño CAD (Computer-Aided Design) 3D de cada uno de los instrumentos de medición y de la sección de pruebas del túnel se realizó en el software SOLIDWORKS® 2015; los diseños fueron elaborados con un alto grado de similitud y detalle. Para la simulación dinámica del aire, se utilizó el software CFD ANSYS® 15.0. Se realizó análisis en tres dimensiones, tomando como dominio computacional un volumen de aire isotérmico a 25 °C en la sección del túnel, y efectuándolo en estado estable con modelo de turbulencia simple (k-épsilon). Se impusieron condiciones de frontera simples (entrada a velocidad constante, flujo desarrollado y salida a la presión atmosférica local). Se creó una malla tetraédrica, generada por ANSYS Mesh®, con tamaño automático y enfoque lagrangiano. La malla resultante

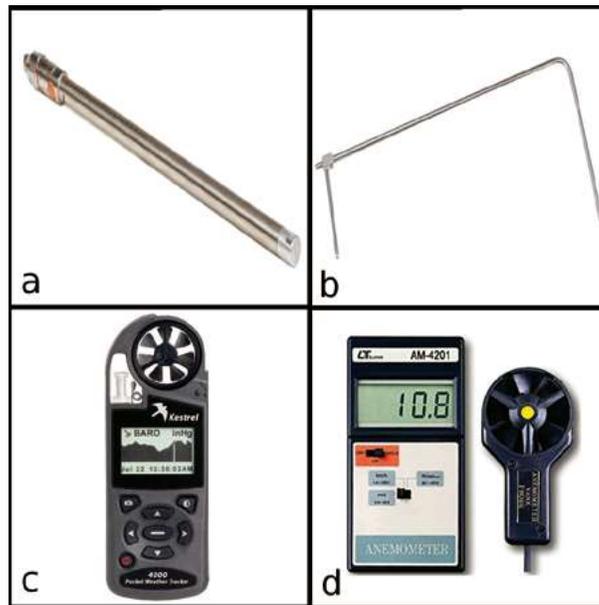


Figura 3. Medidores utilizados. **a.** CTA. **b.** Tubo de Pitot. **c.** Kestrel 4000. **d.** THA.

Fuente: catálogos de anemómetros [22]–[25].

contó con 24618 nodos y 127687 elementos. Los resultados se muestran en la sección 2.1.

Para caracterizar el perfil de velocidad resultante en cada condición experimental, se utilizó el CTA para realizar mediciones en 10 posiciones diferentes a lo largo de un diámetro del área transversal del túnel. La experimentación se llevó a cabo con 4 velocidades nominales de aire en el túnel: 2 m/s, 8 m/s, 14 m/s y 18 m/s. En cada velocidad nominal, se determinó el perfil de velocidad resultante en la posición longitudinal en la cual se ubica el MM, en cuatro condiciones diferentes: (1.) ningún instrumento en la posición del MUT, (2.) el tubo de Pitot en la posición del MUT, (3) el Kestrel, y (4) el THA. De esta manera, se obtuvieron 160 datos experimentales, que configuran un diseño de experimentos de un factor (equipo en la posición del MUT) con dos bloques (velocidad nominal del fluido y posición en el perfil de velocidad), en el cual

la variable de respuesta es la velocidad del aire medida por el CTA.

Para analizar los datos, inicialmente se calculó el efecto de bloqueo de cada instrumento sobre las velocidades puntuales (en cada posición) para las diferentes velocidades nominales experimentadas, calculando la desviación porcentual en cada posición de la velocidad respecto al caso base (ningún instrumento en el área de flujo), de acuerdo a (1):

$$d_{i,j} = \frac{|v_{i,base} - v_{i,j}|}{v_{i,base}} * 100 \quad (1)$$

Donde d_{ij} es la desviación porcentual puntual en la velocidad de fluido en la posición i al introducir como MUT el instrumento j , $v_{i,base}$ es la velocidad del fluido en la posición i cuando no hay instrumento en la posición del MUT, y $v_{i,j}$ es la velocidad de fluido en la

posición i al introducir como MUT el instrumento j . Estos resultados se muestran en la sección 2.2.

El segundo análisis consistió en la aplicación formal de la estadística a los resultados del diseño de experimentos. Al factor estudiado se le denominó "Equipo en calibración", y sus 4 niveles fueron denotados por "ninguno", "Pitot", "Kestrel" y "THA". Al primer bloque se le llamó "Velocidad nominal", con valores posibles "2", "8", "14" y "18", en m/s. El segundo bloque se designó "Distancia al borde", con valores "0,07", "3,8", "7,5", "10,9", "14,3", "14,7", "18,1", "21,5", "25,2" y "28,93", en cm, medidos desde el mismo sitio del borde interno del túnel de viento en la sección donde se ubica el MUT. Se comenzó aplicando un Análisis de Varianza (ANOVA), con miras a determinar si se encontraba evidencia fuerte de que el factor "Equipo en calibración" tiene efecto sobre la velocidad del fluido en la sección de pruebas. A continuación, se llevó a cabo una comparación múltiple entre los niveles del factor estudiado, para concluir cuáles de los niveles ocasionan una velocidad de fluido diferente; esto se hizo

aplicando el método de mínimas diferencias significativas (LSD) de Fisher. Estos análisis estadísticos se presentan en la sección 2.3.

Como tercer análisis, se determinó la corrección por bloqueo que se debe aplicar para aquellos instrumentos que se haya determinado que ocasionan una velocidad diferente a la del caso base (sin obstrucción). Dicha corrección se determina a partir de las desviaciones porcentuales d_{ij} (para el MUT en cuestión, a las diferentes velocidades nominales) en la posición en que se ubica el MM durante las calibraciones (7,5 cm desde el borde interno del túnel). Se aplicó regresión lineal múltiple para obtener modelos de las correcciones como función de la velocidad lineal. Estos resultados se presentan en la sección 2.4.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1 Simulación en software CFD

La figura 4 muestra la malla resultante para uno de los casos de simulación, a modo de ejemplo. La malla presentada corresponde a

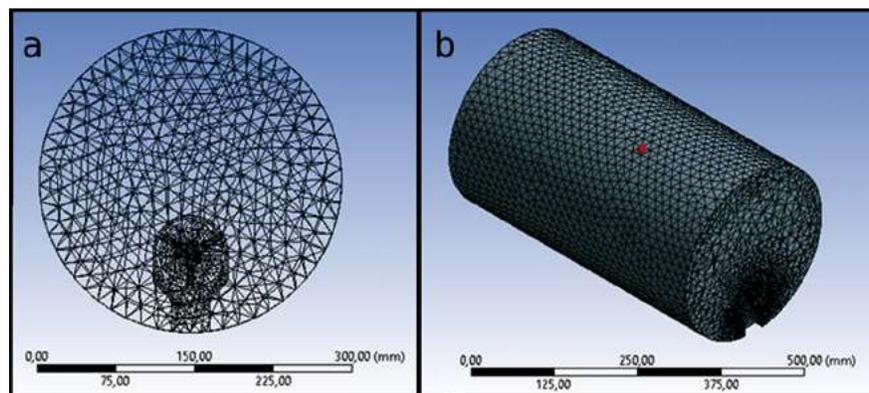


Figura. 4. Ejemplo de la malla utilizada para la simulación CFD. **a.** Vista frontal. **b.** Proyección isométrica.

Fuente: elaboración propia.

la simulación del flujo en el túnel con el THA, en la posición de calibración, y sus características fueron descritas previamente en la sección 1.2.

En las figuras 5, 6 y 7 se observan los contornos de velocidad generados en la sección transversal del túnel de viento operando a diferentes velocidades nominales, mediante la simulación de la presencia de los tres medidores bajo prueba.

En la figura 5 se puede observar que no hay una variación considerable del contorno para bajas velocidades. Para velocidades superiores, es posible identificar algún nivel de distorsión en el perfil de velocidad, aunque el efecto parece ser muy bajo.

En la figura 6 se observa que la simulación indica que la presencia del medidor Kestrel afecta considerablemente el mapa de contorno del perfil de velocidad. Se presenta una zona de muy baja velocidad (re-

gión azul) alrededor del MUT, y una zona de mayor velocidad de aire (región roja y naranja rojizo) a una distancia un poco superior. Esto se debe a que el aire que debería fluir en el sector donde se encuentra el equipo choca contra éste y pierde su energía reduciendo drásticamente su velocidad, y a su vez incrementa la velocidad de las líneas de flujo cercanas, que deben modificar su trayectoria conduciendo a una mayor densidad. Un análisis similar es válido para el THA, cuya simulación se presenta en la figura 7.

2.2 Efecto de la presencia del MUT sobre la velocidad puntual en la sección de calibración

La figura 8 presenta los perfiles de velocidad obtenidos en el túnel de viento, con diámetro de 30 cm, a las velocidades de 2, 8, 14 y 18 m/s (representadas en la figura en los pane-

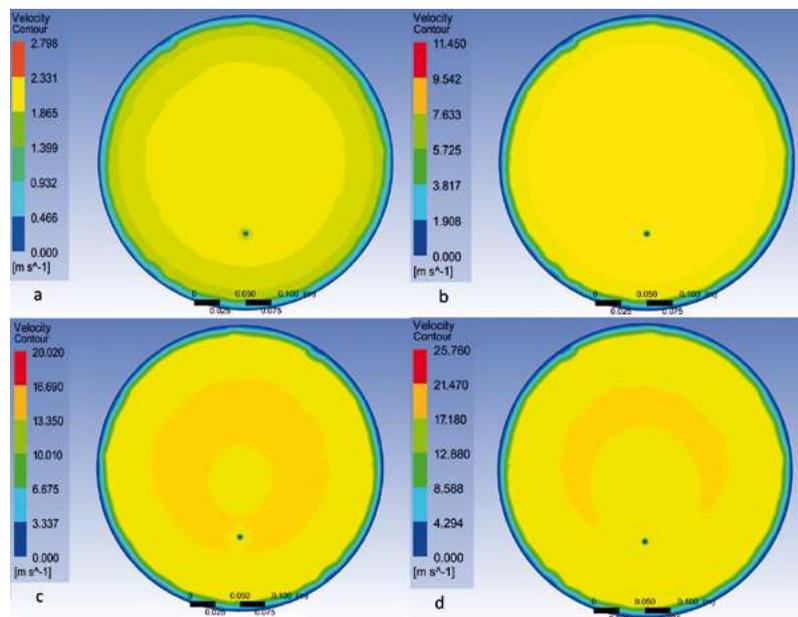


Figura 5. Contornos de velocidad en presencia del tubo de Pitot tipo L. Cada panel corresponde a una velocidad nominal diferente. **a.** 2 m/s. **b.** 8 m/s. **c.** 14 m/s. **d.** 18 m/s.

Fuente: elaboración propia.

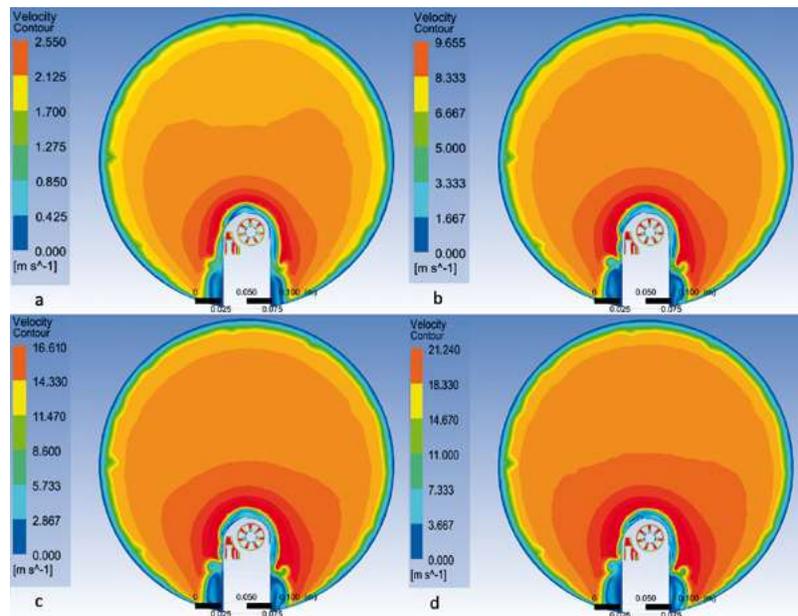


Figura 6. Contornos de velocidad en presencia del Kestrel. Cada panel corresponde a una velocidad nominal diferente. **a.** 2 m/s. **b.** 8 m/s. **c.** 14 m/s. **d.** 18 m/s.

Fuente: elaboración propia.

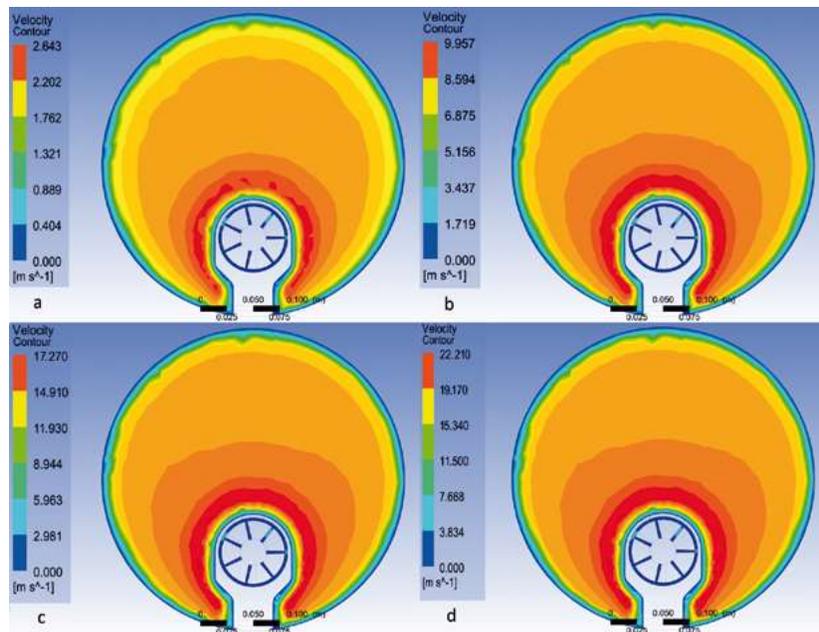


Figura 7. Contornos de velocidad en presencia del THA. Cada panel corresponde a una velocidad nominal diferente. **a.** 2 m/s. **b.** 8 m/s. **c.** 14 m/s. **d.** 18 m/s.

Fuente: elaboración propia.

les a, b, c y d, respectivamente), comparando el perfil cuando no hay obstrucción en el túnel con el obtenido al introducir cada uno de los instrumentos estudiados (tubo Pitot, Kestrel 4000, THA).

Se puede observar que la presencia del tubo de Pitot tipo L, en el interior de la sección de pruebas del túnel de viento, no genera una variación considerable del perfil de velocidad medido por el CTA, ocasionando una distor-

sión que no supera el 1 % de la velocidad puntual. Por otra parte, la presencia del Kestrel genera una desviación de mayor magnitud en el perfil de velocidad del CTA, con incrementos puntuales en la velocidad que oscilan entre 2,5 % y 5,6 %. El caso del THA es similar al del Kestrel; su presencia ocasiona desviaciones puntuales en la velocidad de entre 3 % y 4,6 %.

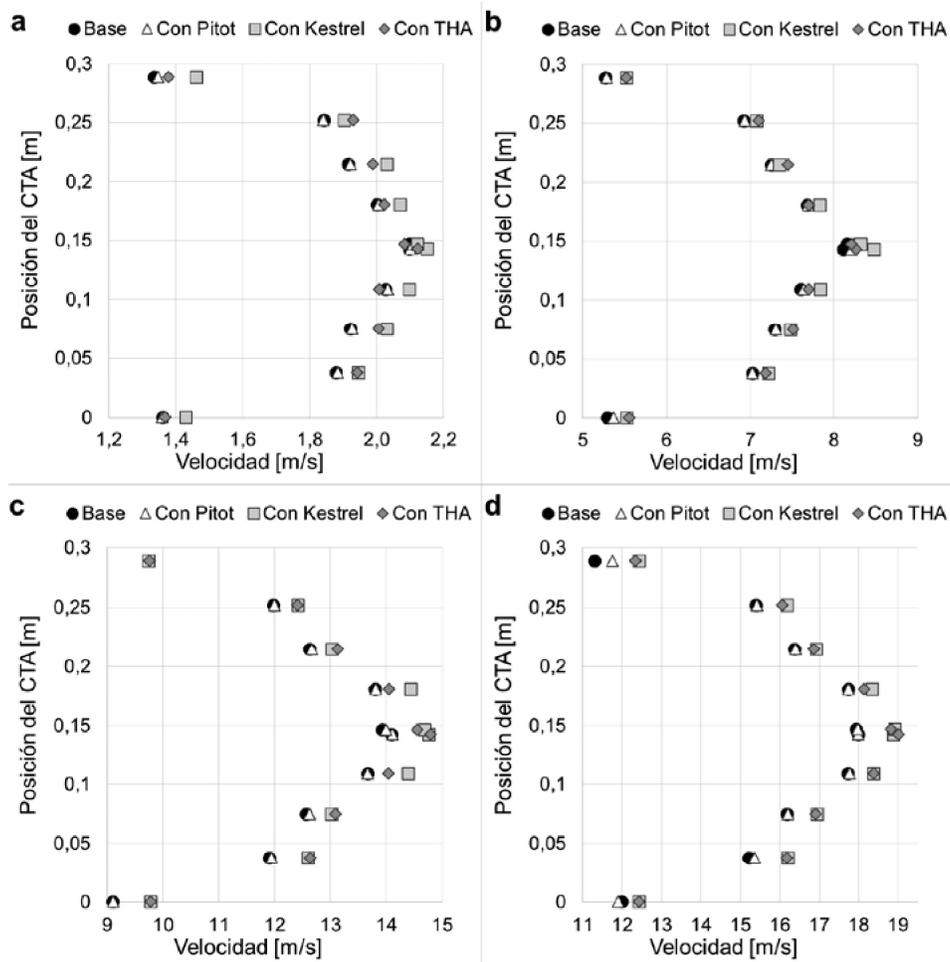


Figura. 8. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia de los MUT. Cada panel corresponde a una velocidad nominal diferente. **a.** 2 m/s. **b.** 8 m/s. **c.** 14 m/s. **d.** 18 m/s.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Análisis de varianza de los resultados del diseño experimental.

Fuente	Sum of squares	Grados de libertad	Mean square	F ₀	Valor P
Equipo en calibración	5,94279	3	1,98093	2,8513	0,03952
Velocidad nominal	4701,31	3	1567,1		
Distancia al borde	275,659	9	30,6287		
Error	100,043	144	0,69475		
Total	5082,95	159			

Fuente: elaboración propia.

2.3 Análisis estadísticos del diseño de experimentos

En la tabla 1 se muestra el resultado del ANOVA a los resultados del diseño con un factor y dos bloques. Se concluye que para un nivel de significancia de 0,05, la evidencia experimental apoya la hipótesis de que la velocidad del aire es afectada por la presencia de instrumentos en la posición del MUT.

Se procede a determinar cuáles de los instrumentos causan una velocidad diferente a la presentada en el caso base, que consiste en la situación en que no hay obstrucción en el túnel (es decir, no hay MUT). Para esto, se emplea el método LSD de Fisher, enfocándose en las comparaciones entre el nivel 1 del factor (ningún instrumento en la posición del MUT) y cada uno de los demás niveles; los resultados se presentan en la tabla 2. El análisis mediante el método LSD permite afirmar que no hay una diferencia significativa entre el valor me-

dido por el CTA sin obstrucciones (nivel 1 del factor) y el valor medido por el CTA cuando se encuentra el tubo Pitot tipo L dentro del túnel (nivel 2), por lo cual se concluye que este medidor no genera un efecto de bloqueo significativo. Sin embargo, para los medidores Kestrel y THA hay evidencia fuerte de dicha diferencia, lo que indica que la velocidad en la posición donde se ubica el CTA durante una calibración es alterada significativamente por la presencia de dichos instrumentos.

2.4 Determinación de la corrección por bloqueo

Se procede a estudiar el sesgo en la velocidad de gas en la posición del instrumento patrón, para las condiciones que distorsionan la velocidad en dicha posición. La tabla 3 muestra los sesgos porcentuales en la velocidad d_{ij} para cada una de las velocidades

Tabla 2. Determinación de parejas de condiciones con las que se presenta diferente velocidad de aire en la posición en que se ubica el medidor patrón.

Comparación <i>i</i> vs. <i>j</i> *	$ \widehat{\mu}_i - \widehat{\mu}_j $	LSD	¿Es significativa la diferencia?
1 vs 2	0,0407	0,36839	No
1 vs 3	0,3791	0,36839	Sí
1 vs 4	0,42731	0,36839	Sí

* 1: flujo sin obstrucciones. 2: tubo de Pitot como MUT. 3: Kestrel como MUT. 4: THA como MUT.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Sesgo porcentual generado por la presencia de los anemómetros sobre la velocidad de gas en la posición del instrumento patrón.

Velocidad nominal [m/s]	Kestrel	THA
	$d_{i,Kestrel}$ [%]	$d_{i,THA}$ [%]
2	5,619	4,318
8	2,450	3,004
14	3,614	4,167
18	4,710	4,587

Fuente: elaboración propia.

nominales en el túnel de viento.

Se aprecia en la tabla 3 que el error porcentual varía ostensiblemente con la velocidad nominal para el caso del Kestrel, mientras que para el THA se podría considerar que una misma corrección sería válida para las distintas velocidades estudiadas. Se decide modelar el error en la velocidad como función de la velocidad nominal en el túnel, por medio de un polinomio cuadrático para el Kestrel, y como una constante para el THA. La aplicación de regresión lineal múltiple a los datos, según los órdenes polinomiales recién mencionados, conduce a (2) y (3). De esta manera, las siguientes ecuaciones permiten determinar la corrección que debe aplicarse a la velocidad medida por el instrumento patrón en la calibración de anemómetros, aplicable a instrumentos Kestrel y THA de dimensiones similares a los usados en el estudio, en calibraciones con velocidades nominales del aire de entre 2 m/s y 18 m/s:

$$V_{Kestrel, corr} = -0,0032v_{Kestrel}^2 + 1,0164v_{Kestrel} - 0,128 \quad (2)$$

$$V_{THA, corr} = 0,959v_{THA} \quad (3)$$

$V_{Kestrel, corr}$: velocidad de aire, corregida por el efecto de bloqueo del Kestrel, del instru-

mento patrón, durante la calibración de un Kestrel.

$V_{Kestrel}$: velocidad de aire medida por el instrumento patrón durante la calibración de un Kestrel.

$V_{THA, corr}$: velocidad de aire, corregida por el efecto de bloqueo del THA, del instrumento patrón, durante la calibración de un THA.

V_{THA} : velocidad de aire medida por el instrumento patrón, durante la calibración de un THA.

3. CONCLUSIONES

La simulación realizada en el software CFD predijo adecuadamente el comportamiento cualitativo de la velocidad de aire al interior del túnel de viento, cuando se introducen en éste diferentes tipos de instrumento de medición de velocidad de gases.

La experimentación realizada en el presente trabajo permite concluir que la existencia de efecto sobre la velocidad de aire medida por el instrumento patrón en la calibración de anemómetros en un túnel de viento depende de las dimensiones del instrumento bajo prueba. Los instrumentos de menores dimensiones (como un tubo de Pitot) no causan una distorsión significa-

tiva, mientras que instrumentos de mayor tamaño sí afectan significativamente la medición registrada por el instrumento patrón, al obstruir una porción importante del área transversal del túnel de viento. Las anteriores conclusiones están soportadas en un ANOVA y una aplicación del método LSD de Fisher a los resultados del diseño experimental. Cuando el efecto de bloqueo es significativo, es fundamental cuantificar el sesgo ocasionado en la velocidad medida por el instrumento patrón, de manera que sea posible corregir el resultado de la calibración considerando este efecto y no se presente un error sistemático en las calibraciones realizadas en el túnel de viento.

Para el caso del túnel de viento WSL20, que fue el objeto de estudio del presente trabajo, se obtuvieron ecuaciones de corrección aplicables a la velocidad de aire medida por el instrumento patrón cuando el instrumento bajo prueba es un Kestrel o un THA, a partir de la aplicación de regresión lineal múltiple a los sesgos en la velocidad identificados en la posición particular donde se encuentra el MM durante la calibración. La aplicación de estas ecuaciones de corrección impedirá que el efecto de bloqueo afecte los resultados de calibración de equipos de tamaño significativo, al ser calibrados en el túnel WSL20. La determinación de ecuaciones de corrección para la calibración de anemómetros en túneles de viento diferentes, requiere la ejecución de pruebas experimentales específicas usando el túnel de viento de interés.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al ingeniero Jhon Freddy Alfonso Serrano, del CDT de Gas, por su invaluable apoyo en la etapa de simulación del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] L. E. García Sánchez, y J. F. Alfonso Serrano, "Túnel de viento: Una solución de trazabilidad para las mediciones de velocidad de gases (Anemometría) en Colombia," *Met&Flu*, no. 9. pp. 54-61, 2014.
- [2] W. Jian, "Realisation of a primary air velocity standard using laser doppler anemometer and precision wind tunnel," in *XIX IMEKO World Congress - Fundamental and Applied Metrology*, 2019.
- [3] T. T. Yeh, y J. M. Hall, "Airspeed calibration service," NIST special publication, *National Institute of Standards and Technology*, no. 250-79, 2007.
- [4] P. Martín Rodríguez, E. Martín Rodríguez, A. Loredó-Souza y E. B. Camano Schettini, "Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en túnel de viento," *EAC*, vol. 35, no. 1, pp. 78-92, 2014.
- [5] L. E. García Sánchez, J. Angarita y O. Naranjo, "La velocidad en gases: aspectos

- metrológicos," *Met&Flu*, no. 3, pp. 4-24, 2010.
- [6] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), *Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*, 2005.
- [7] P. G. Spazzini, A. Picatto, y R. Malvano, "Metrological features of the linear low-speed anemometer calibration facility at INRIM," *Metrologia*, vol. 46, pp. 109-118, 2009. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/1/014>
- [8] J. E. Hardy y T. E. McKnight, "Reducing uncertainty in low flows for benchtop wind tunnels," *Sensor Review*, vol. 25, no. 1, pp. 46-50, 2005. <https://doi.org/10.1108/02602280510577834>
- [9] J. Riu, B. Ricard, A. Maroto, y F. X. Rius, "Trazabilidad en medidas físicas mediante calibración directa: calibración de una balanza" Departamento de Química Analítica y Química Orgánica, Universitat Rovira i Virgili, 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.quimica.urv.cat/quimio/general/calbal.pdf>
- [10] G. Nader, C. dos Santos, P. J. S. Jabardo, M. Cardoso, N. M. Taira y M. T. Pereira, "Characterization of low turbulence wind tunnel", in *XVIII IMEKO World Congress - Metrology for a sustainable development*, 2006.
- [11] A. M. Santos et al. "Effects of screens set characteristics on the flow field in a wind tunnel", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 733, 012001, 2016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012001>
- [12] K. Ahmad, M. Khare y K. K. Chaudhry, "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - a review," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, pp. 697-717, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.04.002>
- [13] Y. Terao, M. Takamoto y T. Katagiri, "Very low speed wind tunnel for anemometer calibration," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, vol. 63, no. 607, pp. 938-943, 1997. <https://doi.org/10.1299/kikaib.63.938>
- [14] Estados Unidos Mexicanos, Instituto Nacional de Ecología. *Operación de Estaciones de Medición de la Calidad del Aire, Mantenimiento y Calibración de sus Componentes - Manual 4*, 2013.
- [15] H. Thomson y W. H. Stevenson. *Laser velocimetry and particle sizing*. Hemisphere Publishing Corporation, 1979.
- [16] E. Ower y E. C. Pankhurst. *The measurement of air flow*. Pergamon Press, 1966.
- [17] T. Terao, M. van der Beek, T. T. Yeh, y H. Müller. *Final report on the CIPM air speed key comparison (CCM.FF-K3)*, 2007.
- [18] O. A. Morales, A. Gómez, y R. Vázquez, "Medición de perfiles de velocidad en túnel de viento," *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, vol. 1, no. 2, 2014.
- [19] J. E. Danberg. *Evaluation of 5-cm agent fate wind tunnel velocity profiles*. Edgewood Chemical Biological Center, 2007.

- [20] A. Motin, y M. A. T. Ali, "Flow characteristics in the test section of a wind tunnel," *Proceedings of the 4th BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering*, 2014.
- [21] I. Care, y M. Arenas, "On the impact of anemometer size on the velocity field in a closed wind tunnel," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 44, pp. 2-10, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.007>
- [22] SCHMIDT Technology. *SCHMIDT Flow Sensor S 20.400*. [En línea]. Disponible en: <http://www.schmidt-sensors.com/sensor-20.400/index.html>
- [23] Kimo Instruments. *Ficha de datos técnicos - Tubos de Pitot tipo L*. [En línea]. Disponible en: <http://www.equiposkimo.es/ftpitotl.pdf>
- [24] Kestrel Meters. *Kestrel 4000*, 2014 [En línea]. Disponible en: <https://kestrelmeters.com/products/kestrel-4000-weather-meter>
- [25] Lutron Electronic Enterprise. *Lutron Anemometer AM-4201*. [En línea]. Disponible en: http://www.lutron.com.tw/ugC_ShowroomItem_Detail.asp?hidKindID=1&hidTypeID=7&hidCatID=&hidShowID=785&hidPrdType=&txtSrhData=