

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE ANEMÓMETROS DE
DISTINTOS TAMAÑOS SOBRE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y LA
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES EN EL TÚNEL DE VIENTO WSL 20 DEL CDT
DE GAS**

**EDISON GERARDO GRANADOS AVELLANEDA
CAROLINA MADOLET PINTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE ANEMÓMETROS DE
DISTINTOS TAMAÑOS SOBRE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y LA
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES EN EL TÚNEL DE VIENTO WSL 20 DEL CDT
DE GAS**

**EDISON GERARDO GRANADOS AVELLANEDA
CAROLINA MADOLET PINTO**

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
Ingeniero Químico

Director:

CARLOS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ

Ph.D. en Ingeniería Química

Codirector:

JHON FREDDY ALFONSO SERRANO

Ingeniero de Energía

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios, por darnos salud, bienestar y por permitirnos sacar adelante la carrera y el proyecto de grado.

A la Corporación CDT de Gas, por recibirnos en sus instalaciones y permitirnos llevar a cabo el trabajo de investigación.

Al Dr. Carlos Eduardo García, por brindarnos la oportunidad de trabajar con él en el semillero de investigación del CDT de Gas y por la confianza depositada en nosotros.

Al ingeniero Jhon Alfonso, por los conocimientos brindados para llevar a cabo este trabajo.

A los docentes de la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Química por esta maravillosa experiencia y por los conocimientos recibidos para formarnos como profesionales integrales.

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a una persona en especial. A la persona que fue y será mi mayor orgullo e inspiración para el resto de mi vida. A esa persona que día a día me motivó a ser mejor y que gracias a todo su apoyo, amor, consejos y enseñanzas, hoy logramos cumplir este sueño.

Este proyecto es para ti Papá.

Faltaba tan poco que aún me parece mentira lo que sucedió. Y a pesar de que ya no puedas acompañarme en el final de esta etapa, sé que me seguirás guiando desde el cielo.

Hoy tengo una motivación más fuerte para seguir adelante y lograr todo lo que un día soñamos.

Le agradezco a toda mi familia, en especial a mi mamá María del Carmen, a mis hermanos Leonardo,

Julieth y Camilo por brindarme todo su apoyo, amor y fortaleza.

A mi pareja Geraldine por su compañía, amor y paciencia durante este proceso.

EDISON GRANADOS

A Dios, por darme la oportunidad de vivir esta experiencia y la fuerza necesaria para lograr mis objetivos y sueños.

A mi abuelo Emiliano Pinto, por ser como un padre para mí y ser mi apoyo incondicional todos estos años y a mi mamá Eunice Pinto, por todo su amor, apoyo, paciencia y los sacrificios que hizo para que yo cumpliera mis sueños, por la fe y la confianza que depositaron en mí.

A mis hermanos Nathaly Madolet por la compañía durante todo este proceso, porque a pesar de nuestras diferencias siempre ha estado para mí, apoyándome, dándome alientos para seguir adelante. Y Santiago Torres por ser mi mayor motivación para continuar y ser mejor cada día.

A mis amigos, Gerson Conde por su total apoyo, paciencia, comprensión y compañía todos estos años y a Leidy Rincón, por apoyarme hasta finalización de esta etapa.

A Kevin Rosas, a quién admiro no sólo por ser un excelente docente sino también por ser una gran persona, por estar en el momento preciso para darme ánimo de seguir adelante, por sus consejos, amistad, apoyo y compañía.

A todos los que de alguna u otra forma me demostraron su apoyo, regalándome palabras de aliento para seguir adelante, en especial a mi compañero de aventuras Daniel Orostegui por bríndame su amistad y compañía.

CAROLINA MADOLET

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	29
1.1 SIMULACIÓN EN SOFTWARE CFD	30
1.2 PREPARACIÓN DEL TÚNEL	30
1.3 REGISTRO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES	31
1.4 MEDICIONES DE VELOCIDAD CON EL CTA	31
1.5 COMPARACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DEL CTA	32
1.6 DISEÑO EXPERIMENTAL	33
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
2.1 SIMULACIÓN EN SOFTWARE CFD	35
2.2 MEDICIONES DE VELOCIDAD CON EL CTA	39
2.3 COMPARACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DEL CTA	41
2.3.1 Modelo I	41
2.3.2 Modelo II	41
2.4 EFECTO DE LA PRESENCIA DEL MUT SOBRE EL PERFIL DE VELOCIDAD MEDIDO POR EL CTA	43

2.4.1 Tubo Pitot tipo L.....	44
2.4.2 Kestrel 4000	45
2.4.3 Termohigroanemómetro	46
2.5 ANÁLISIS DE BLOQUES	47
3. CONCLUSIONES	51
4. RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	53
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS	63

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Túneles de viento.	22
Figura 2. Secciones principales de un túnel de viento.	23
Figura 3. Túnel de viento WSL 20.	26
Figura 4. Intervalo de medición y aplicación del túnel WSL 20.	27
Figura 5. Diagrama de flujo del trabajo experimental.	29
Figura 6. Medidores utilizados.	33
Figura 7. Ubicación del MM y el MUT en la sección de pruebas.	34
Figura 8. Contornos de velocidad en presencia del Tubo de Pitot tipo L.	36
Figura 9. Contornos de velocidad en presencia del Kestrel 4000.	37
Figura 10. Contornos de velocidad en presencia del Tha.	38

Figura 11. Perfiles de velocidad del túnel WSL 20 medidos con el CTA.	40
Figura 12. Comparación de los perfiles de velocidad del CTA y del modelo I.	42
Figura 13. Comparación de los perfiles de velocidad del CTA y del modelo II.	43
Figura 14. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia del tubo Pitot.	44
Figura 15. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia del Kestrel 4000.	45
Figura 16. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia del Tha.	46
Figura 17. SCHMIDT Flow Sensor SS 20.400.	64
Figura 18. PITOT L serie 160E.	66
Figura 19. Anemómetros rotativos.	68
Figura 20. Configuraciones de túneles de viento.	69
Figura 21. Zonas de distribución velocidades para flujo turbulento en tubería de sección circular.	73
Figura 22. Esquema sistema de ventiladores del túnel de viento WSL 20.	74

Figura 23. Guía para el ajuste del CTA en la zona de pruebas del túnel.	75
Figura 24. Ingreso de datos al Opto 22.	76
Figura 25. Tendencias de flujo.	77
Figura 26. Resultados del Opto 22.	77
Figura 27. Túnel de viento WSL 20.	79
Figura 28. Estructura del túnel de viento WSL 20.	80
Figura 29. Montaje experimental.	90
Figura 30. Vista lateral del montaje experimental.	91
Figura 31. Medidores bajo prueba (MUT).	91
Figura 32. Módulo de adquisición de datos para el CTA y el Tubo Pitot.	92
Figura 33. Transmisor Tubo Pitot L.	92

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales países y laboratorios con túneles de viento y patrones para aplicación metrológica.	25
Tabla 2. Túneles de viento en Colombia.	26
Tabla 3. Diseño experimental.	31
Tabla 4. Resultados experimentales para el CTA.	39
Tabla 5. Tabla de ANOVA.	48
Tabla 6. Método LSD.	48
Tabla 7. Error porcentual generado por la presencia de los anemómetros.	49
Tabla 8. Clasificación túneles de viento.	70
Tabla 9. Clasificación del régimen de flujo.	71
Tabla 10. Fijación del Voltaje.	76

Tabla 11. Relación lineal Corriente: Velocidad.....	82
Tabla 12. Relación lineal Corriente: Diferencial de presión.	83
Tabla 13. Constantes utilizadas en el procedimiento matemático.	85
Tabla 14. Desviación del modelo teórico I con los datos experimentales.	93
Tabla 15. Desviación del modelo teórico II con los datos experimentales.	94
Tabla 16. Datos del análisis por bloques.....	95
Tabla 17. Velocidad registrada por el MM y el MUT en la posición 7,5 cm.	96

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. INSTRUMENTOS COMÚNMENTE USADOS PARA LA MEDICIÓN DE BAJAS VELOCIDADES EN GASES (0,5 m/s A 25 m/s)	64
ANEXO B. TÚNELES DE VIENTO.....	69
ANEXO C. REGÍMENES DE FLUJO	71
ANEXO D. SISTEMA DE VENTILADORES	74
ANEXO E. AJUSTE DEL CTA.....	75
ANEXO F. TÚNEL DE VIENTO WSL 20	79
ANEXO G. REGISTRO DE CONDICIONES AMBIENTALES	81
ANEXO H. PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO PARA LA CONVERSIÓN DE SEÑAL ANÁLOGA A VELOCIDAD	82
ANEXO I. MODELOS TEÓRICOS PARA LA DESCRIPCIÓN DE PERFILES DE VELOCIDAD EN RÉGIMEN DE FLUJO TURBULENTO.....	86

ANEXO J. MONTAJE EXPERIMENTAL	90
ANEXO K. DESVIACIÓN DEL MODELO TEÓRICO CON EL EXPERIMENTAL ..	93
ANEXO L. ANÁLISIS POR BLOQUES	95
ANEXO M. VELOCIDAD REGISTRADA POR LOS INSTRUMENTOS EN LA POSICIÓN 7,5 cm	96

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE ANEMÓMETROS DE DISTINTOS TAMAÑOS SOBRE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES EN EL TÚNEL DE VIENTO WSL 20 DEL CDT DE GAS*

AUTORES: EDISON GERARDO GRANADOS AVELLANEDA, CAROLINA MADOLET PINTO**

PALABRAS CLAVE: PERFIL DE VELOCIDAD, TÚNEL DE VIENTO, MEDIDORES DE VELOCIDAD DE GASES

DESCRIPCIÓN: Los procesos industriales que involucran el uso de anemómetros para medir la velocidad de distintos gases son aplicados con frecuencia para prever caudales determinantes en la eficiencia y seguridad de dichos procesos, por lo cual es importante garantizar la fiabilidad y precisión de las mediciones con estos instrumentos. Para ello, es necesario evaluar periódicamente el desempeño de los anemómetros por medio de calibraciones, las cuales pueden verse influenciadas por la presencia del anemómetro en el conducto durante el proceso de medición.

Sin embargo, es importante estudiar las distorsiones que se pueden presentar en los perfiles de velocidad generados por el tamaño y la geometría de los anemómetros durante la medición en túneles de viento. Con base en lo expuesto, el presente trabajo de investigación, desarrollado con la ayuda de la Corporación CDT del Gas, tuvo como objetivo estudiar y modelar los perfiles de velocidad generados por flujos de aire dentro del túnel de viento WSL 20 y el efecto de las obstrucciones presentes en el área transversal de flujo causadas por el medidor bajo prueba, y de esta forma evaluar su influencia en las mediciones y los procesos de calibración de instrumentos.

Como resultado de la investigación se obtiene que existe una relación directa entre el área ocupada por el medidor bajo prueba dentro del túnel de viento y la velocidad registrada por el instrumento de referencia; los anemómetros rotativos generaron la mayor distorsión del perfil de velocidad debido a que presentan la mayor área, con errores que oscilan entre el 2,5% y 5,6%, mientras el tubo Pitot tipo L no ocasionó una distorsión significativa en el perfil de velocidad.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D Carlos Eduardo García Sánchez.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE EFFECT OF THE PRESENCE OF DIFFERENT SIZES ANEMOMETERS ON SPEED PROFILES AND METERS CALIBRATION IN THE WIND TUNNEL WSL 20 OF THE GAS CDT *

AUTHORS: EDISON GERARDO GRANADOS AVELLANEDA, CAROLINA MADOLET PINTO**

KEYWORDS: SPEED PROFILE, WIND TUNNEL, GAS SPEED METERS

DESCRIPTION: Industrial processes involving the use of anemometers to measure the velocity of different gases are used often to predict flows that are determinant on the efficiency and safety of these processes, so it is important to guarantee the reliability and precision of the measurements with these instruments. For this reason, it is necessary to evaluate periodically the performance of the anemometers using calibrations, which can be influenced by the presence of the anemometer in the pipe during the measurement process.

However, is important to study the distortions that can occur in the velocity profiles generated by the size and geometry of the anemometers during the measurement in wind tunnels. Based on the above, the present research work, developed with the help of the CDT Gas Corporation, aimed to study and model the velocity profiles generated by airflows within the WSL 20 wind tunnel and the effect of obstructions present in the transverse area of flow caused by the presence of the meter under test, to be able to evaluate its influence on the measurements and the calibration processes of instruments.

As a result of the investigation it is obtained that there is a direct relationship between the area occupied by the meter under test within the wind tunnel and the speed recorded by the reference instrument; The rotational anemometers generated the greatest distortion of the velocity profile because they present the largest area, with errors ranging from 2,5% to 5,6%, while the Pitot type L tube did not cause a significant distortion in the speed profile.

* Bachelor thesis.

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. Chemical Engineering department. Advisor: Ph.D Carlos Eduardo García Sánchez.

INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de túneles de viento ha permitido generar avances importantes en la medición de velocidad en gases, variable requerida para el estudio de diversas aplicaciones a nivel industrial e investigativo. Entre los sectores de aplicación de las tecnologías de medición de gases se encuentran el monitoreo y control de emisiones atmosféricas, la aerodinámica, los sistemas de refrigeración, la meteorología, el potencial eólico y distintos procesos industriales [1]. Los túneles de viento son ideales para estas aplicaciones debido a que permiten deducir el caudal del fluido a partir de la medición de la velocidad en determinadas condiciones [1]. Es posible realizar estas mediciones empleando diferentes instrumentos teniendo en cuenta los requisitos metrológicos del caso.

En vista del crecimiento mundial de las aplicaciones que involucran la medición de gases se ha desarrollado una gran variedad tecnológica de instrumentos como los anemómetros y los tubos de Pitot, los cuales varían en tamaño, geometría, nivel de precisión, intervalo de medida, condiciones de medición, y principio de operación. Actualmente los medidores de velocidad más utilizados para bajas velocidades en gases (de 0,5 m/s a 25 m/s), pueden ser clasificados en tres grupos: tubos de Pitot, basados en el principio de Bernoulli; anemómetros rotativos, que registran el valor de la velocidad mediante la rotación de partes móviles y principios inerciales; y anemómetros térmicos, donde la velocidad es medida a través del enfriamiento por convección de un hilo calentado eléctricamente [2,3]. En el Anexo A se describen sus principales características y principio de operación.

El uso de los anemómetros es cada vez más frecuente en la industria, de tal manera que es importante garantizar la fiabilidad y precisión de las mediciones con estos instrumentos. Para ello, es necesario evaluar periódicamente el desempeño de los anemómetros por medio de calibraciones [4]. Según la Environmental Protection Agency de Estados Unidos, la calibración se define como: “la comparación de un patrón de medición, o de un equipo, con un patrón o equipo de mayor exactitud, para detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste” [5]. De allí la gran importancia que tiene la calibración, ya que establece la relación de valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente a un patrón de referencia, proporcionando validez y trazabilidad [6].

La trazabilidad es una condición necesaria para la confiabilidad de las mediciones y, de acuerdo al Vocabulario Internacional de Términos Generales de Metrología, se define como “la propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón por lo cual pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo en cuenta todas las incertidumbres determinadas” [7]. Esto significa que la trazabilidad garantiza que los resultados sean comparables, válidos y reproducibles, independientemente del lugar donde se hayan realizado las mediciones.

Los procesos de calibración pueden clasificarse en dos grandes grupos: directos e indirectos [8]. 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

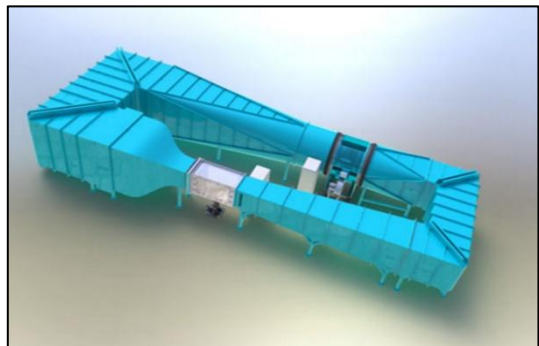
la medición [1]. La variable comparada durante la medición suele expresarse como un error en términos absolutos de acuerdo a la ecuación 1:

$$E_{MUT} = V_{MUT} - V_{MM} \quad (1)$$

Donde E_{MUT} representa el error o desviación de la velocidad registrada por el medidor bajo prueba con respecto al patrón; V_{MUT} y V_{MM} son las velocidades registradas por el MUT y el MM respectivamente.

Al ser una magnitud dinámica, la velocidad requiere un medio para su reproducción, el cual puede ser generado mediante túneles de viento de diversas dimensiones, configuraciones y modos de operación [1]. En principio, en un túnel de viento se busca tener un flujo controlado con fines experimentales para conocer la interacción dinámica entre un cuerpo sólido o un instrumento de medición y el flujo uniforme del aire a diversas condiciones de velocidad [9]. Usualmente, el intervalo de trabajo en los túneles se encuentra entre 0,5 m/s y 60 m/s, y están presentes principalmente en dos tipos de instalaciones convencionales: circuito abierto y circuito cerrado [3], los cuales se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Túneles de viento.



a) Circuito abierto.

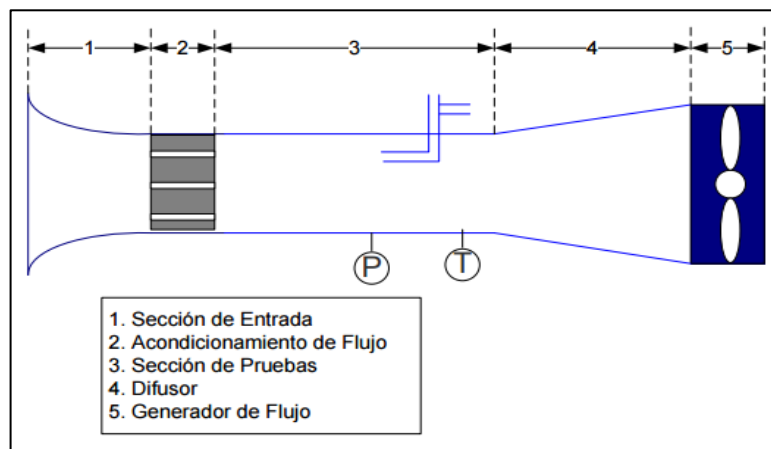
b) Circuito cerrado.

Fuente: Aerolab LLC.

En los túneles de circuito abierto el aire es expulsado directamente al lugar donde se encuentra ubicado, el cual debe ser lo suficientemente grande para garantizar que no se presenten perturbaciones en el flujo y variaciones en la temperatura del mismo [10]. Por su parte, el túnel de circuito cerrado permite tomar el flujo de aire de un camino continuo y cerrado. En el Anexo B se esquematizan distintas configuraciones de túneles de viento.

La estructura de un túnel de viento puede tener diversas configuraciones con el fin de garantizar condiciones de flujo lo suficientemente estables para lograr un perfil uniforme y con bajas fluctuaciones, evitando así desprendimientos de la capa límite [9]. Sin embargo, cada túnel de viento debe estar compuesto por 5 secciones, independientemente de su diseño: sección de entrada, acondicionador de flujo, cámara o sección de pruebas, difusor de salida y generador de flujo, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Secciones principales de un túnel de viento.



Fuente: Tomado de referencia [11].

A su vez, la relación entre la velocidad que se pueda desarrollar en la sección de pruebas y la velocidad del sonido, conocida como número de Mach, permite caracterizar los túneles de viento en: Subsónicos ($Mach < 0,4$), Transónicos ($0,4 < Mach < 1,3$), Supersónicos ($1,3 < Mach < 4$) e Hipersónicos ($Mach > 4$) [11]. En el Anexo C se describen los regímenes de flujo que se pueden presentar en un túnel de viento y las teorías relacionadas con cada uno.

La gran mayoría de túneles de viento que existen el mundo se emplean con fines aerodinámicos. Sin embargo, en los últimos años varios países han venido trabajando en el desarrollo de túneles de viento con fines metrológicos en velocidad de gases. Para evidenciar el avance en torno a estas instalaciones y los patrones utilizados con el fin de garantizar mediciones de velocidad trazables al Sistema internacional, en la Tabla 1 se muestran algunos de los principales laboratorios y países con túneles de viento y patrones para aplicación metrológica.

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. Así, los anemómetros láser Doppler (LDA) son los más utilizados como patrones de referencia a nivel mundial, debido a su baja incertidumbre y a la posibilidad de medir la velocidad en los tres ejes coordenados. Sin embargo, los medidores térmicos y los Pitot tipo L también se emplean como instrumentos de referencia en la calibración de anemómetros [3].

Tabla 1. Principales países y laboratorios con túneles de viento y patrones para aplicación metrológica.

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
			1,3 – 67	---
Suiza	METAS	Medidor portátil en túnel abierto	0,02 – 13	2,5 – 0,14
Alemania	PTB	1. LDA – Disco Rotativo	0,1 – 15	0,10
		2. LDA – túnel abierto	0,5 – 60	5,0 – 0,08
		3. LDA – túnel cerrado	0,2 – 60	0,50
Holanda	NMI	Medidor portátil en túnel abierto	0,1 – 1,0	3,0 – 1,0
			1,0 – 50	1,0
Brasil	IPT	Tubo Pitot L	2 – 40	---
		Hilo Caliente (CTA)		
México	Labinthap	LDA	5 – 30	---
Francia	CETIAT	LDA	0,05 – 2	2,0 – 1,0
			0,15 – 40	6 – 0,6
Turquía	UME	Tubo Pitot L	0,50 – 20	0,9
Lituania	VMT/LEI	Tobera convergente	0,2 – 3,0	7,0 – 3,0
		Pitot L en túnel cerrado	3,0 – 60	3,0 – 1,0
Estonia	UTC	Tobera	4,0 – 40	4,0 – 2,0

Fuente: Tomado y adaptado de referencia [3]

A nivel nacional, hay un bajo desarrollo metrológico en materia de velocidad de gases, evidenciado por limitados niveles de capital humano e infraestructura en esta temática. En el país existe un número considerable de túneles de viento académicos y empresariales enfocados principalmente a estudios aerodinámicos [1], pero solo cuenta con dos túneles de viento para aplicaciones metrológicas, el primero de ellos desarrollado por el CDT de Gas, mientras el segundo es un túnel de pequeñas dimensiones adquirido por Higielectronix. En la Tabla 2 se presenta el listado de los túneles de viento que existen en el país.

Tabla 2. Túneles de viento en Colombia.

Aplicación Aerodinámica	Aplicación Metrológica
UNAL Bogotá	CDT de GAS Higielectronix
UPB Medellín	
Universidad de los Andes	
Uni – Libertadores	
Aerocivil	
Fuerza Aérea Colombiana	
Escuela de Aviación INEC – Pereira	
Centro de Estudios Aeronáuticos – CEA	
Eolus Aviation Limitada – Medellín	

Fuente: Tomado y adaptado de referencia [1].

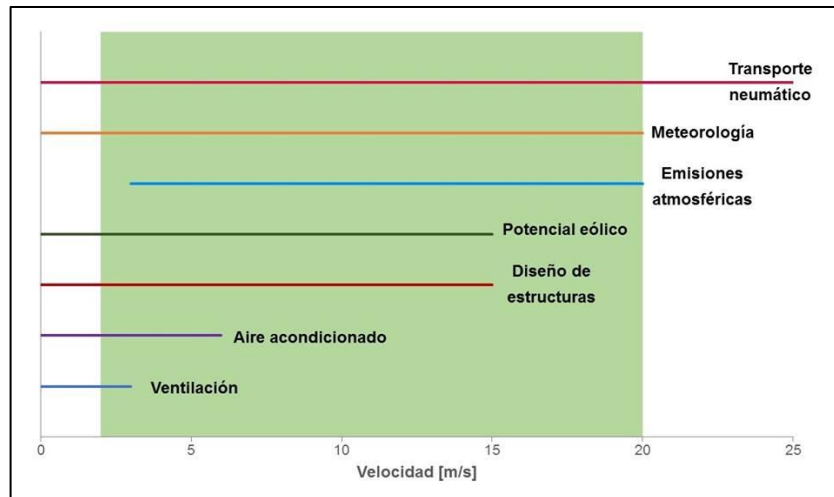
El túnel de viento del CDT de Gas ha sido llamado WSL 20 por su nombre en inglés (“*Wind Speed Laboratory 20 m/s*”), y se muestra en la Figura 3. En el 2015 el CDT de Gas obtuvo la acreditación en la norma ISO 17025 del Organismo Nacional de Acreditación (ONAC) para la prestación de servicios de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire y gases entre 2 y 20 m/s con el WSL 20, siendo la primera entidad del país en ofrecer este servicio [12]. El intervalo de velocidad se eligió de manera que abarcara la mayor parte de los sectores de interés en el país en materia de medición de velocidad de gases, como se muestra en la Figura 4.

Figura 3. Túnel de viento WSL 20.



Fuente: Corporación CDT de Gas [13].

Figura 4. Intervalo de medición y aplicación del túnel WSL 20.



Fuente: Tomado y adaptado de referencia [1].

Los procesos industriales que involucran el uso de anemómetros para medir la velocidad de distintos gases son aplicados con frecuencia para prever caudales determinantes en la eficiencia y seguridad de dichos procesos, por lo cual la industria requiere mediciones fiables y precisas. Esto implica tener en cuenta la presencia del anemómetro en el conducto durante el proceso de medición y la 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.

En instituciones y laboratorios como el Instituto Nacional de Normas y Tecnología de Estados Unidos, el Instituto de Ciencias de Fluidos de la Universidad de Tohoku de Japón, el Laboratorio Nacional de Investigación de Metrología en Japón y el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada del Instituto Politécnico Nacional en México se llevan a cabo investigaciones en el comportamiento de flujos gaseosos en distintos regímenes y estudios en la caracterización de perfiles de velocidad, para conocer la influencia generada por la geometría del túnel e instrumentos utilizados durante el proceso [14]. Sin

embargo, los estudios no evidencian de forma detallada el impacto en la calibración de instrumentos y las distorsiones que se pueden presentar en los perfiles de velocidad generados por el tamaño de los medidores [15].

Viendo la importancia que genera tomar mediciones precisas y confiables de la velocidad en gases durante la calibración de instrumentos y su posterior aplicación a los procesos de interés, se pone en evidencia la necesidad de un aseguramiento metrológico para esta magnitud. Por tal motivo, es necesario elaborar estudios experimentales para determinar el efecto que genera la presencia de anemómetros de distintos tamaños durante el proceso de medición, así como la mejora en los métodos de calibración de anemómetros en túneles de viento.

Con base en lo expuesto, el presente trabajo de investigación, desarrollado con la ayuda de la Corporación CDT del Gas, se realizó para estudiar y modelar el perfil de velocidad del flujo de aire dentro del túnel de viento WSL 20 empleando un anemómetro término de temperatura constante (CTA), con el objetivo de determinar las variaciones en la medición causadas por la presencia de tres anemómetros de diferente tamaño: un Tubo Pitot tipo L y dos rotativos denominados Pocket Weather Meter (Kestrel 4000) y Termohigroanemómetro (Tha).

1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo del trabajo experimental realizado durante el curso de la presente investigación.

Figura 5. Diagrama de flujo del trabajo experimental.



El túnel de viento cuenta con un sistema de 7 ventiladores que opera en 3 grupos independientes de ventiladores; dos de los grupos están compuestos por 3 ventiladores, mientras el restante se compone de 1. Inicialmente se realizó una prueba de potencia y estabilidad del flujo generado por cada sistema de ventiladores, y sólo fue posible alcanzar la velocidad de 18 m/s utilizando 6 o 7 ventiladores; así, se descartaron las demás configuraciones mostradas en el Anexo D para no afectar el diseño experimental. Finalmente, fue seleccionado el sistema de 7 ventiladores ya que generó un flujo de aire más estable.

1.1 SIMULACIÓN EN SOFTWARE CFD

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 (licenciado al CDT de Gas). Los diseños fueron elaborados con un alto grado de similitud y detalle con el fin de obtener resultados aproximados a los experimentales. La simulación dinámica del aire se llevó a cabo en el software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) ANSYS® 15.0 (licenciado al CDT de Gas), en donde se modelaron los montajes experimentales usando aire como fluido de trabajo y teniendo en cuenta la presión y temperatura del laboratorio.

1.2 PREPARACIÓN DEL TÚNEL

Se verificó el estado físico del túnel y los medidores, de tal forma que no tuvieran ninguna obstrucción en su interior que pudieran afectar las mediciones. Los ajustes previos y la adquisición de datos se realizaron mediante un software denominado “Estrategia de Calibración del Túnel de Viento”, con la cual se verificó que los instrumentos estuvieran correctamente alineados y conectados al banco de adquisición de datos del túnel, como se muestra en el Anexo E.

La generación de flujo de aire en el túnel se obtiene a partir de un conjunto de 7 ventiladores axiales por succión de alto caudal, controlados manualmente por voltaje, sumados a un difusor para recuperación de presión y una sección de adecuación mejorada, las imágenes del túnel se muestran en el Anexo F.

1.3 REGISTRO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Durante el proceso experimental se monitorearon en el laboratorio la humedad relativa [%], la presión [hPa] y la temperatura [°C], con un intervalo de una hora entre cada medición, ya que se requieren para realizar correcciones a los valores de velocidad. Las mediciones se realizaron empleando el anemómetro Kestrel 4000, que posteriormente será usado como MUT, y los valores obtenidos se muestran en el Anexo G.

1.4 MEDICIONES DE VELOCIDAD CON EL CTA

La adquisición de datos para el medidor CTA (SCHMIDT flow sensor SS 20.400) se realizó para 4 velocidades nominales (aquella que se establece como velocidad máxima al interior del túnel de viento): 2, 8, 14 y 18 m/s. Para cada una de las velocidades nominales se realizó un barrido de posiciones del CTA, medida desde la pared hacia el interior del túnel de viento, las cuales se muestran en la Tabla 3. Cada una de las mediciones realizadas se replicó 3 veces para garantizar la fiabilidad de los resultados.

Tabla 3. Diseño experimental.

Velocidad	Posición del CTA									
[m/s]	[cm]									
2	0,07	3,80	7,50	10,90	14,30	14,70	18,10	21,50	25,20	28,93
8	0,07	3,80	7,50	10,90	14,30	14,70	18,10	21,50	25,20	28,93
14	0,07	3,80	7,50	10,90	14,30	14,70	18,10	21,50	25,20	28,93
18	0,07	3,80	7,50	10,90	14,30	14,70	18,10	21,50	25,20	28,93

Los datos se obtuvieron mediante el software Opto 22 con salida análoga en corriente, cuyos valores se encuentran entre 4 y 20 mA. Estos valores se relacionan linealmente con la velocidad de operación del túnel en un rango de 0 a 20 m/s como se muestra en el Anexo H, con lo cual se convirtió la señal análoga en corriente a los valores pertenecientes al perfil de velocidad del CTA.

1.5 COMPARACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DEL CTA

Los resultados obtenidos para los perfiles de velocidad del CTA se compararon con los resultados de dos modelos teóricos que se presentan en el Anexo I, con el fin de determinar cuál de ellos describe con mayor exactitud el comportamiento real del perfil de velocidad.

El primer modelo permite determinar la velocidad del fluido en aquellas zonas donde el régimen de flujo sea laminar o turbulento. Dado que se espera que el régimen sea turbulento en el interior del túnel de viento, el modelo consiste en una expresión logarítmica en función de la rugosidad de la sección de pruebas y de la distancia hasta la pared del túnel, recopilada en el libro *“Hidráulica de Tuberías”* del profesor Juan Saldarriaga de la Universidad de los Andes [16].

Por su parte, el segundo modelo se basa en dos ecuaciones encontradas en el libro *“Mecánica de Fluidos”* de Robert Mott, las cuales están en función de la distancia hasta la pared del túnel y del factor de fricción, el cual se determina mediante la ecuación de Colebrook que depende a su vez del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la sección de pruebas [17].

1.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó el barrido de posiciones que permiten generar el perfil de velocidad del medidor de referencia CTA (MM) en presencia de tres medidores bajo prueba (MUT): Tubo Pitot tipo L (Dwyer series 160E); Kestrel 4000 (Pocket Weather Meter) y Termohigroanemómetro (Tha - EXTECH Instruments). Los 4 instrumentos se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Medidores utilizados.



a) CTA.



b) Tubo de Pitot L.



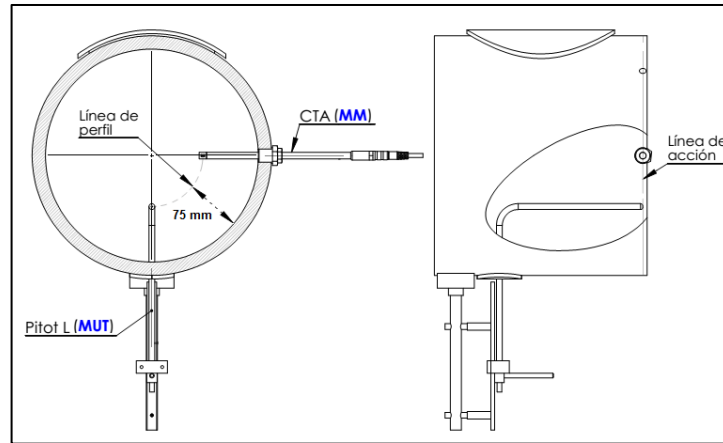
c) Kestrel 4000.



d) Tha.

Para esto, durante cada experimento se ubicó el correspondiente MUT en la posición 7,5 cm como se explica en el Anexo J, y se realizó el barrido con el medidor CTA a lo largo de las mismas posiciones que se usaron para el CTA sin obstrucciones como se muestra en la Figura 7. Nuevamente, las velocidades nominales al interior del túnel de viento son 2, 8, 14 y 18 m/s y para cada una de ellas se mide la velocidad registrada por el CTA (que permite general el perfil de velocidad) y la registrada por el correspondiente MUT. Se realizaron 3 réplicas para cada una de las mediciones, con el objetivo de garantizar una mayor validez de los resultados.

Figura 7. Ubicación del MM y el MUT en la sección de pruebas.



Fuente: Corporación CDT de Gas [13].

Cabe aclarar que los valores que se obtuvieron para el Kestrel 4000 y el Tha se encontraban directamente en unidades de m/s, por lo cual no se requirió de ninguna modificación adicional. Sin embargo, los valores que se obtuvieron para el Tubo de Pitot tipo L se encontraban en unidades de mA, por lo cual se convirtieron a m/s empleando el valor de densidad del aire calculado de acuerdo al procedimiento sugerido por el Comité Internacional de Pesos y Medidas [18]. El procedimiento para realizar dicha conversión se presenta en el anexo H.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1 SIMULACIÓN EN SOFTWARE CFD

Por medio del software de Dinámica de Fluidos Computacionales ANSYS® 15.0, se obtuvo una descripción del comportamiento del flujo de aire en régimen turbulento al interior de la sección de pruebas del túnel de viento, en presencia de cada uno de los MUT que se emplean durante la experimentación.

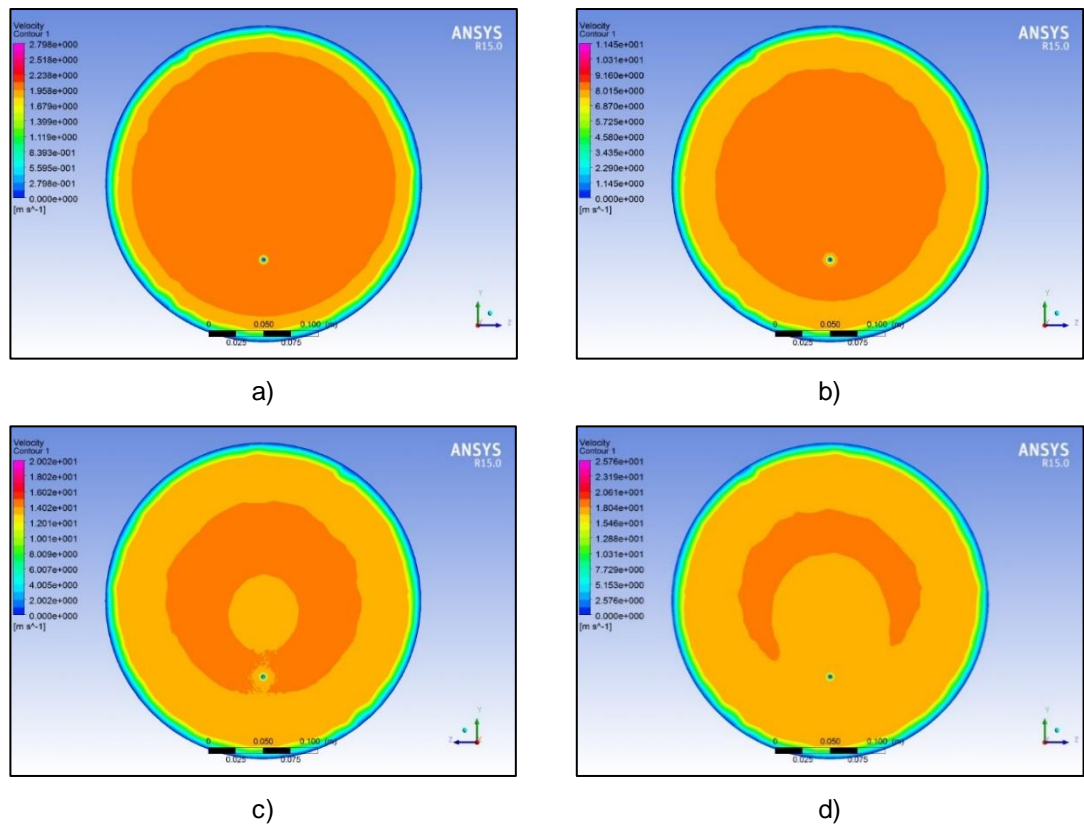
En las Figuras 8, 9 y 10 se observan los contornos de velocidad generados en la sección transversal del túnel de viento, mediante la simulación de la presencia de los 3 medidores bajo prueba donde la velocidad nominal (en m/s) es: a) 2, b) 8, c) 14 y d) 18.

En la Figura 8 se puede observar que no hay una variación considerable del contorno esperado cuando la velocidad nominal es baja, es decir, 2 m/s. Cuando la velocidad nominal es de 8 m/s se observa que en la región cercana a las paredes del túnel la velocidad disminuye, y este comportamiento se mantiene para las dos velocidades nominales restantes.

Sin embargo, al aumentar la velocidad nominal se presenta un cambio en el centro del contorno, donde la velocidad disminuye. Esto se puede atribuir a la presencia del Tubo de Pitot tipo L dentro del sistema, debido a que el aire que choca contra

el equipo de medición pierde energía (el área donde se encuentra el tubo es azul y representa velocidades muy bajas) y por lo tanto presenta una velocidad menor cuando fluye alrededor del tubo. De igual forma ocurre con el contorno para la velocidad nominal de 18 m/s, pero es posible que el efecto sea más notorio debido a una mayor pérdida de energía ante el cambio repentino de la velocidad del aire.

Figura 8. Contornos de velocidad en presencia del Tubo de Pitot tipo L.

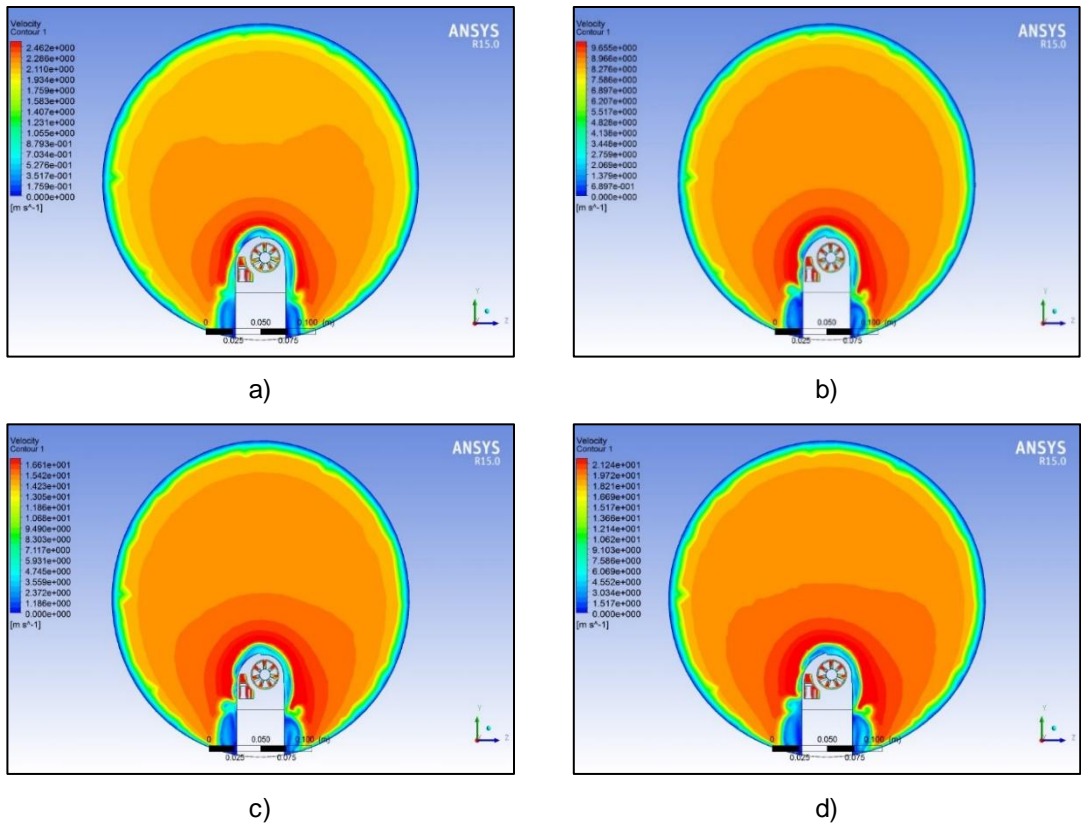


En la Figura 9 se observa que la presencia del medidor Kestrel 4000 afecta considerablemente el contorno de velocidades, lo cual se evidencia en una zona de muy baja velocidad (región azul alrededor del MUT) seguido inmediatamente de una zona de muy alta velocidad (región roja). Es posible que esto se deba 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.

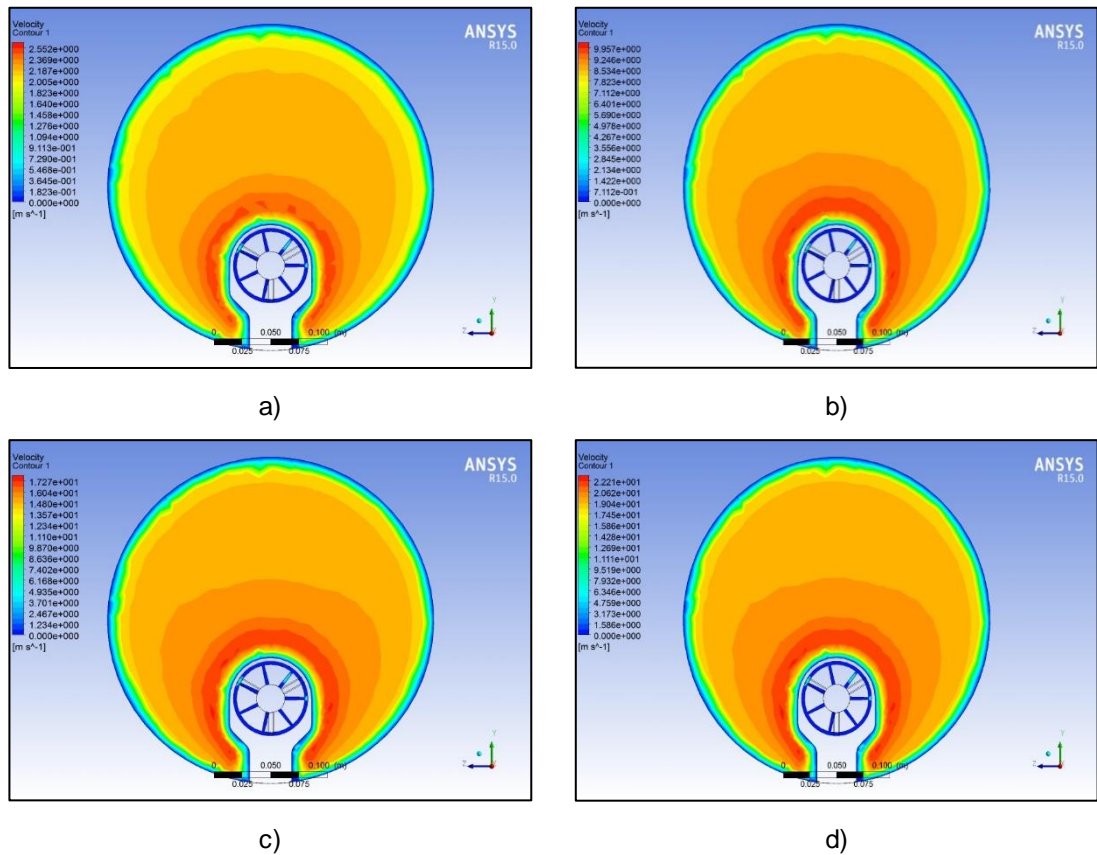
Sin embargo, el aire que pasa justo al lado del equipo se encuentra con la masa de aire de baja velocidad, lo cual podría provocar la formación de remolinos que aumenten la velocidad generando la región roja observada. Además, es importante resaltar que el aumento en la velocidad nominal reduce la uniformidad en la velocidad del flujo de aire, es decir, existe una mayor distancia entre la zona de alta velocidad y la zona de velocidad correspondiente a la nominal.

Figura 9. Contornos de velocidad en presencia del Kestrel 4000.



En la Figura 10 se observa que la presencia del medidor Tha también afecta considerablemente el contorno de velocidades, como ocurre en el caso anterior. Sin embargo, el efecto es más atenuado, como se puede apreciar en la tonalidad de la región de alta velocidad (región naranja oscuro). Es posible que esto ocurra debido a que el área donde se bloquea el flujo de aire por la presencia del equipo es menor, ya que la sección del equipo que corresponde a las partes móviles es mayor.

Figura 10. Contornos de velocidad en presencia del Tha.



2.2 MEDICIONES DE VELOCIDAD CON EL CTA

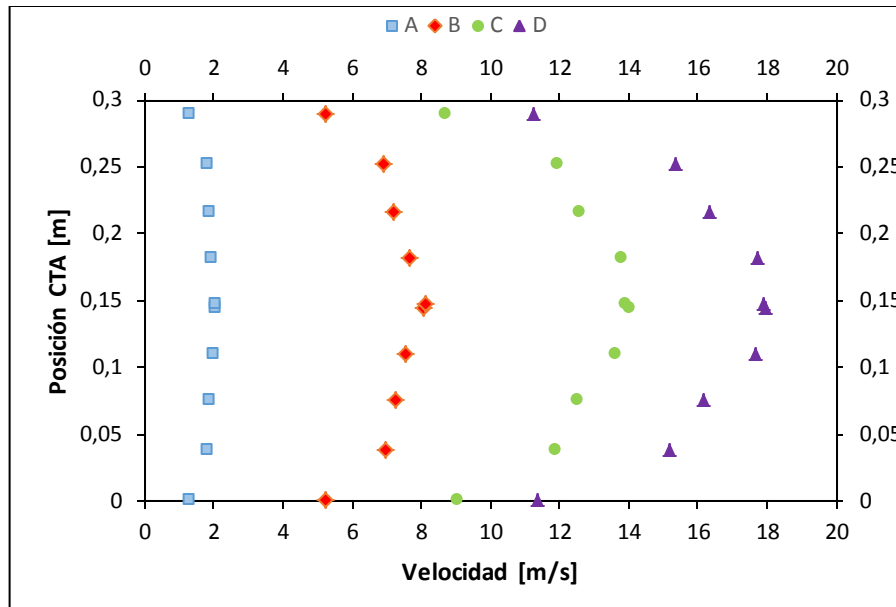
El resultado de las velocidades máximas y promedio registradas por el CTA en las mediciones de los perfiles de velocidad, al igual que los números de Reynolds y el régimen característico de cada configuración se presentan en la Tabla 4. La viscosidad y densidad del aire empleadas para la determinación del número de Reynolds son de 0,0001825 poise y 1,0573 kg/m³ respectivamente, cuyos valores fueron obtenidos mediante el procedimiento matemático mostrado en el anexo H.

En la Figura 11 se muestran los valores experimentales obtenidos para las velocidades nominales de 2, 8, 14, y 18 m/s en función de la posición transversal del CTA a lo largo de la sección de pruebas del túnel sin ninguna obstrucción.

Tabla 4. Resultados experimentales para el CTA.

Velocidad Nominal [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad Promedio [m/s]	Número de Reynolds	Régimen de Flujo
2	2,0968	1,8473	35224,54	Turbulento
8	8,1304	7,0575	136586,31	Turbulento
14	14,0061	12,2346	235294,12	Turbulento
18	17,9583	15,7218	301688,60	Turbulento

Figura 11. Perfiles de velocidad del túnel WSL 20 medidos con el CTA.



Velocidad nominal: A) 2 m/s; B) 8 m/s; C) 14 m/s y D) 18 m/s.

Es posible observar que cada uno de los perfiles abarca la ordenada desde 0 hasta 0,29 m que corresponde al diámetro del túnel de viento, por lo cual el perfil de velocidad abarca la totalidad del túnel empleando los 10 puntos pertenecientes al perfil. Además, para la velocidad nominal de 2 m/s se observa que el perfil es prácticamente plano, como es de esperarse debido a que el régimen de flujo que define el sistema es turbulento.

Sin embargo a medida que se aumenta la velocidad nominal, el perfil de velocidad medido por el CTA se asemeja al comportamiento logarítmico, donde el punto máximo se encuentra sobre el eje axial del túnel y su valor es muy cercano a la velocidad nominal.

2.3 COMPARACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DEL CTA

Una vez se cuenta con el perfil medido con el CTA para cada velocidad nominal, se procede a compararlo con los resultados teóricos obtenidos como se muestra en el Anexo K para los modelos I y II.

2.3.1 Modelo I: De acuerdo a la literatura, la zona laminar viscosa conforma únicamente el 2% de la totalidad del perfil de velocidad en un flujo turbulento, por lo cual es posible omitirse durante el análisis [19]. El valor de la rugosidad de la sección de pruebas del túnel (k_s) se estableció como $1,44 \times 10^{-6}$ m [20].

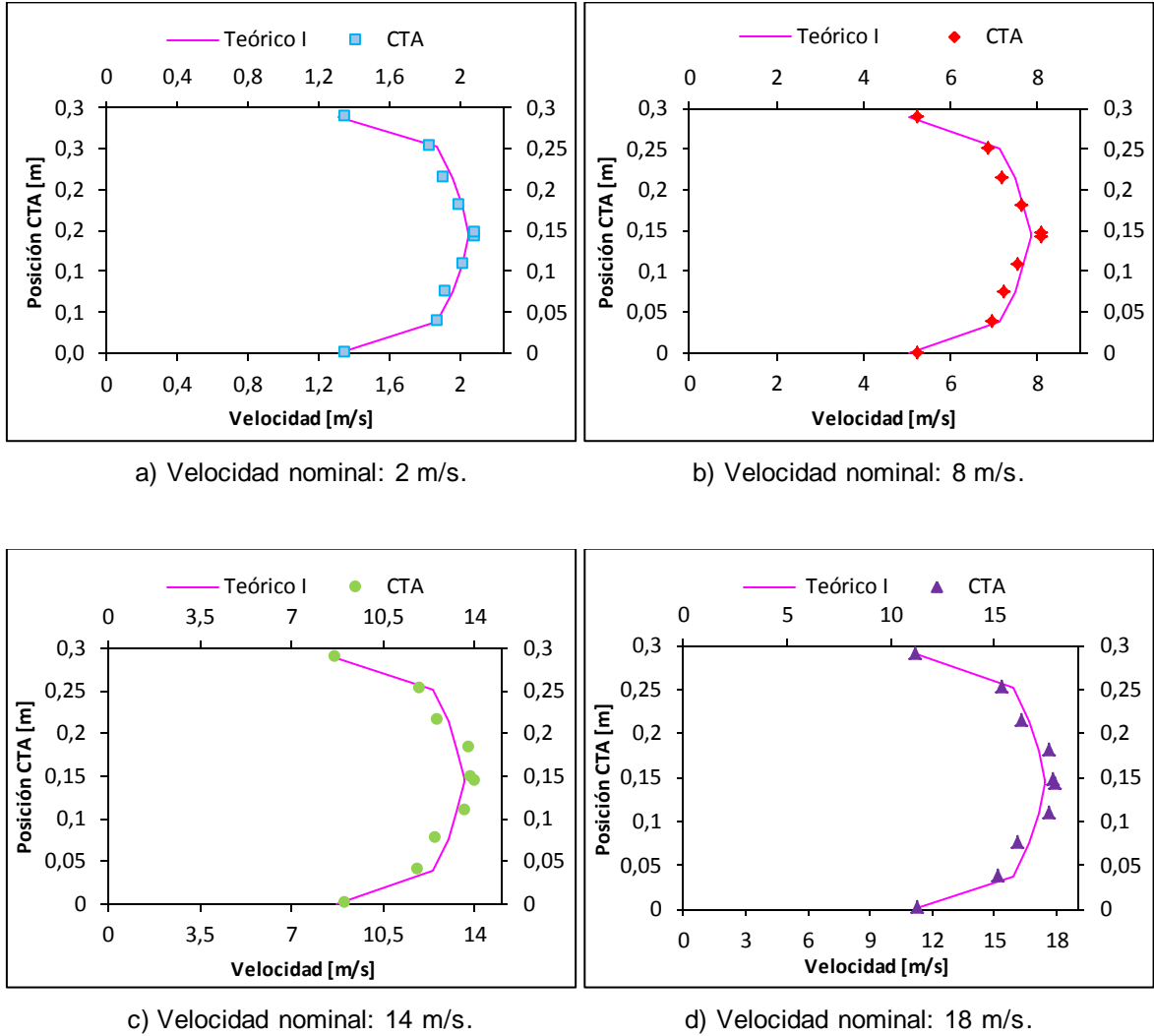
En la Figura 12 se presentan los perfiles de velocidad obtenidos de forma experimental con el CTA y los perfiles obtenidos de forma teórica con el modelo I para las 4 velocidades nominales.

En la gráfica se observa que el modelo teórico I se ajusta de forma adecuada a los datos experimentales obtenidos con el CTA en cada una de las posiciones donde se ubica el medidor, y el error calculado para cada pareja de valores es muy bajo y oscila entre el 1 y 4%.

2.3.2 Modelo II: Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar los perfiles de velocidad para cada uno de los 4 valores nominales, los cuales se presentan en la Figura 13. En este caso la gráfica permite observar que los valores obtenidos mediante el modelo II se alejan de los resultados

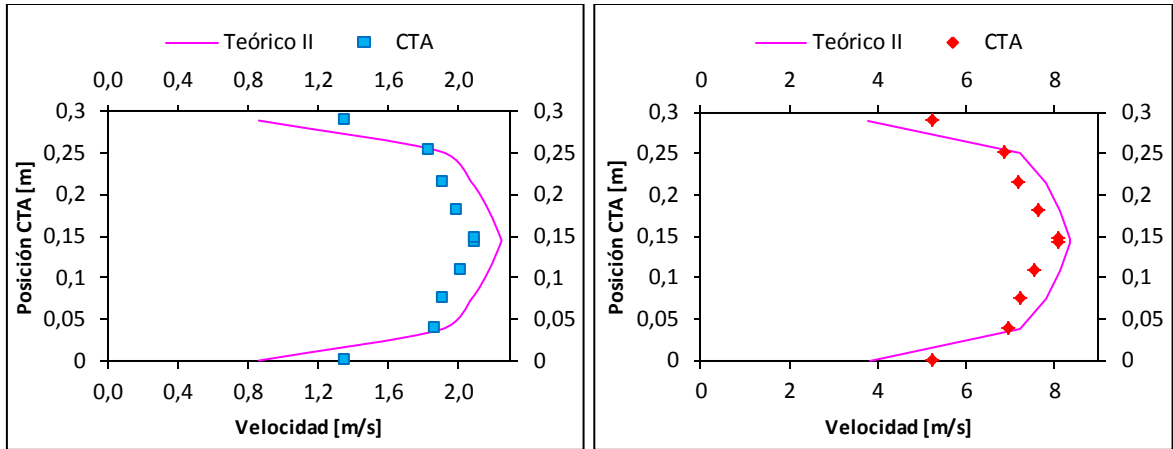
experimentales, comparado a la proximidad del modelo I para cada posición del CTA.

Figura 12. Comparación de los perfiles de velocidad del CTA y del modelo I.



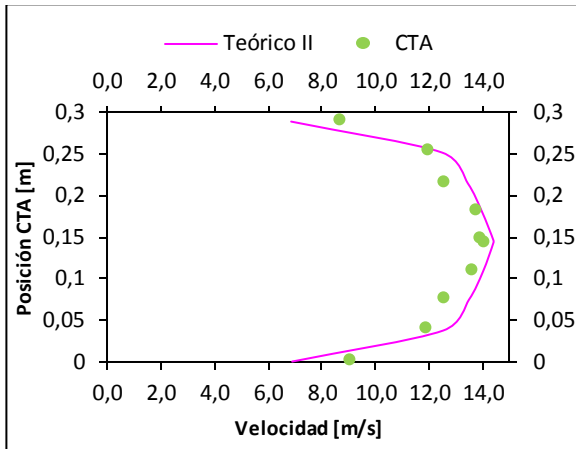
Para aquellas posiciones que se encuentran lejos de las paredes del túnel de viento los errores son relativamente bajos, ya que oscilan entre 1 y 8%; sin embargo, en las proximidades de la pared del túnel de viento se obtienen errores que ascienden hasta 26 y 57%, esto puede suceder debido a las fluctuaciones que se presentan cerca a la pared y lo difícil que es medir allí la velocidad registrada por el CTA.

Figura 13. Comparación de los perfiles de velocidad del CTA y del modelo II.

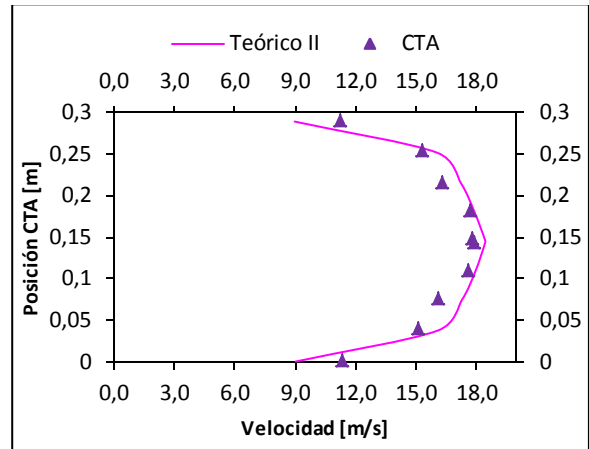


a) Velocidad nominal: 2 m/s.

b) Velocidad nominal: 8 m/s



c) Velocidad nominal: 14 m/s.



d) Velocidad nominal: 18 m/s.

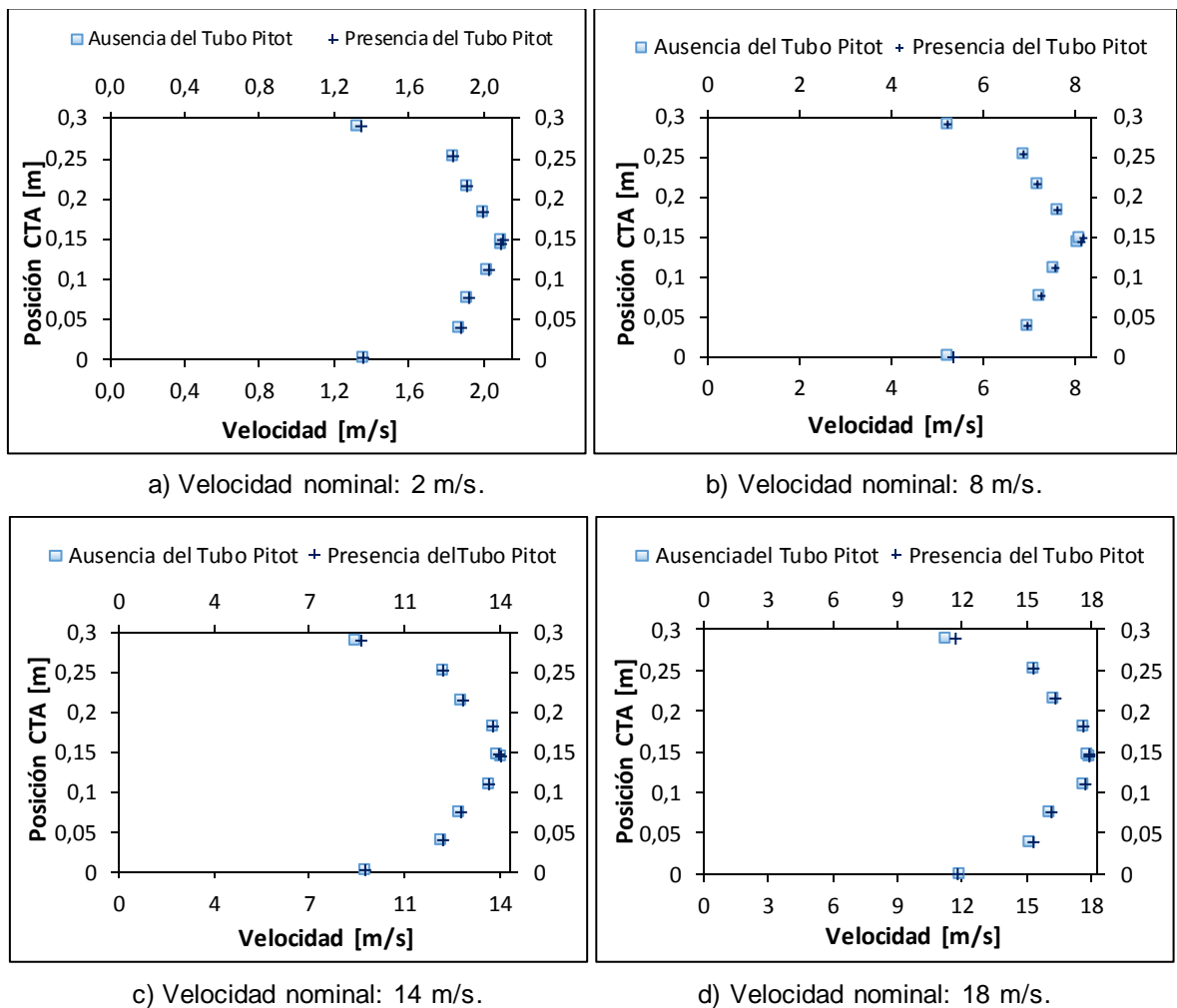
Con base en los resultados de la esta investigación, es posible afirmar que el modelo I permite modelar las condiciones al interior del túnel de viento WSL 20 en ausencia de obstrucciones.

2.4 EFECTO DE LA PRESENCIA DEL MUT SOBRE EL PERFIL DE VELOCIDAD MEDIDO POR EL CTA

El efecto de la presencia en la sección de pruebas del túnel de los 3 MUT evaluados genera una desviación en los perfiles de velocidad medidos por el CTA, por lo cual se evalúa dicha desviación para cada medidor.

2.4.1 Tubo Pitot tipo L

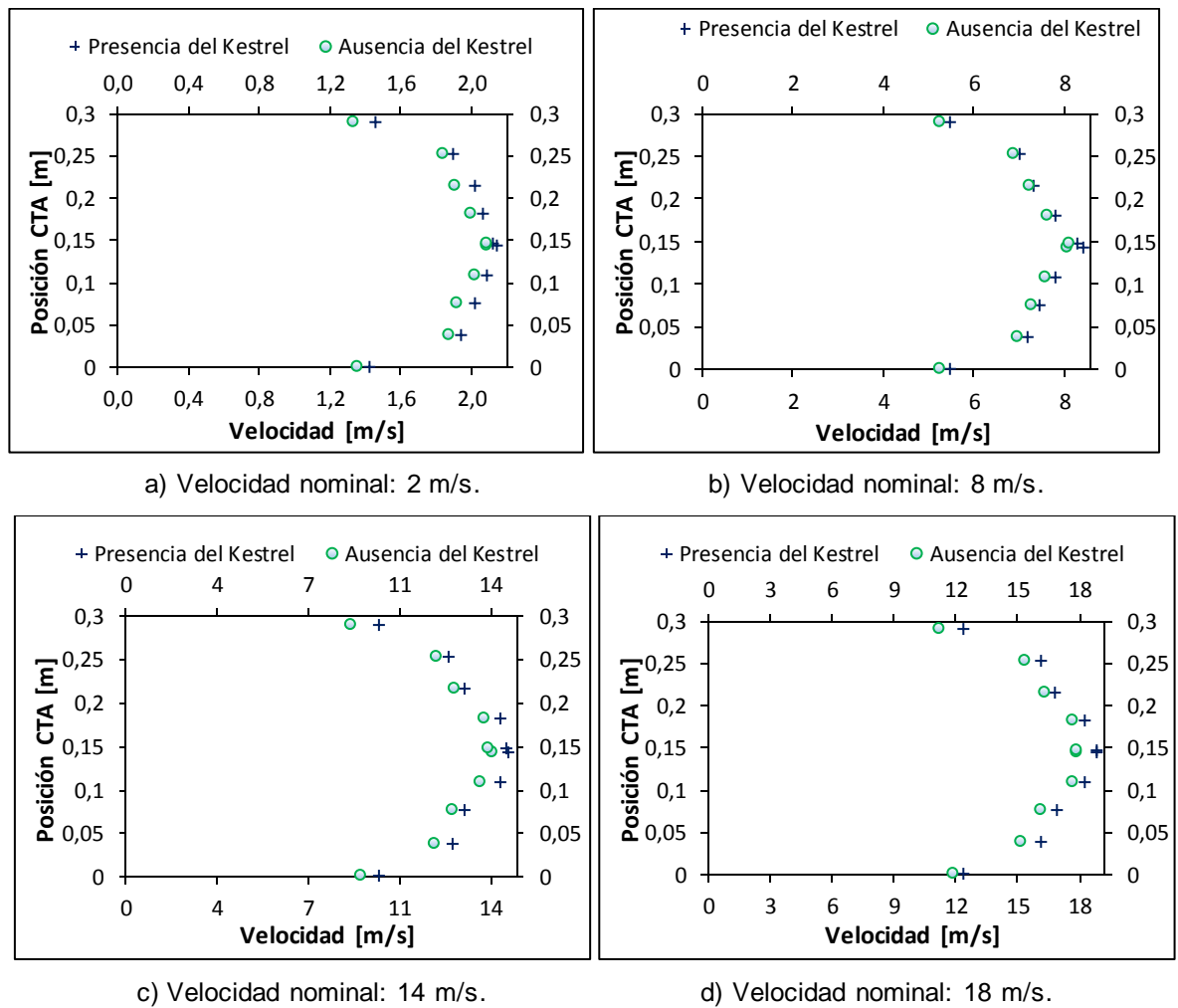
Figura 14. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia del tubo Pitot.



En las gráficas 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, ya que el error calculado no supera el 1%.

2.4.2 Kestrel 4000

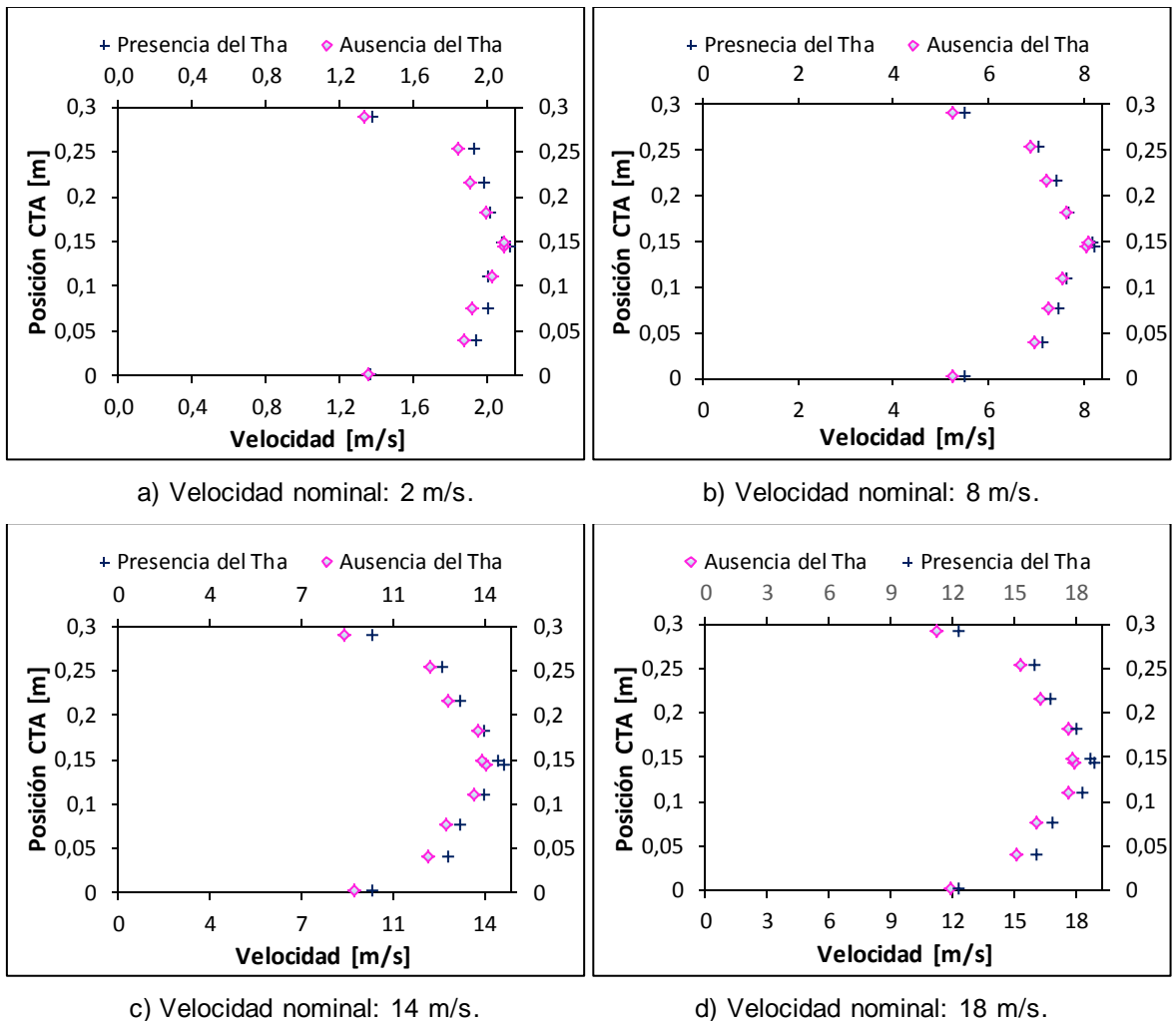
Figura 15. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia del Kestrel 4000.



En las gráficas es posible observar que la presencia del Kestrel 4000 genera una desviación en el perfil de velocidad del CTA mayor comparada con la generada por la presencia del Pitot tipo L, tal como se esperaba de acuerdo a la simulación. Dicha afirmación se confirma mediante los errores calculados, los cuales oscilan entre 2,5% y 5,6%.

2.4.3 Termohigroanemómetro

Figura 16. Perfiles de velocidad del CTA en ausencia y presencia del Tha.



Para el caso del Tha, es posible observar en las gráficas que la presencia del MUT genera una desviación en el perfil de velocidad del CTA, la cual también es mayor comparada con la generada por la presencia del Pitot tipo L. En esta ocasión, los errores calculados oscilan entre 3 y 4,58%.

Nuevamente, el resultado obtenido experimentalmente es de esperarse de acuerdo a la simulación, y la posible explicación está en que el área ocupada por el Tha (igual que ocurre con el Kestrel 4000) es mayor cuando se compara con el área ocupada por el tubo Pitot sobre la línea de flujo, lo que genera una perturbación mayor en el perfil de velocidad al interior del túnel de viento.

2.5 ANÁLISIS DE BLOQUES

Se aplicó el respectivo Análisis de Varianza (ANOVA) al diseño con 1 factor y 2 bloques como se muestra en la Tabla 5. Para esto, se emplea el método LSD para obtener la comparación del perfil de velocidad para el CTA sin obstrucciones con respecto al perfil de velocidad del CTA en presencia de cada uno de los MUT, donde el número 1 representa al CTA, el número 2 al tubo Pitot tipo L, el número 3 al Tha y por último el número 4 al Kestrel 4000. Los resultados del método LSD se presentan en la Tabla 6.

Tabla 5. Tabla de ANOVA.

Fuente	SC	gdl	CP	F0	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			

Tabla 6. Método LSD.

Comparación	ABS($Y_{i..} - Y_{j..}$)	LSD	Diferencia Representativa
1 vs 2	0,0407	0,36839	No
1 vs 3	0,3791	0,36839	Si
1 vs 4	0,42731	0,36839	Si

El análisis mediante el método LSD permite afirmar que no hay una diferencia significativa entre el valor medido por el CTA sin obstrucciones (1) y el valor medido por el CTA cuando se encuentra el tubo Pitot tipo L dentro del túnel (2), por lo cual se obtiene que éste medidor no genera una obstrucción significativa en el perfil de velocidad. Sin embargo, para los medidores Tha (3) y Kestrel 4000 (4) dicha diferencia sí es representativa, lo que indica que el perfil de velocidad medido por el CTA sí se ve afectado significativamente por la presencia de dichos instrumentos.

Teniendo esto en cuenta, se determina el error porcentual que hay en la medición de velocidad en la posición 7,5 cm por el CTA sin obstrucciones y la medición de velocidad del CTA con la presencia del MUT en la misma posición, cuyos resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Error porcentual generado por la presencia de los anemómetros.

Velocidad nominal [m/s]	Kestrel 4000	Tha
	Error [%]	Error [%]
2	5,619	4,318
8	2,450	3,004
14	3,614	4,167
18	4,710	4,587
Promedio	-	4,019

Como se puede observar en la tabla 7, el error porcentual de la medida del CTA cuando está presente el Kestrel 4000 es variable, por lo tanto, para corregir el valor de velocidad medido por el CTA, se realizó una regresión de orden 2, se recomienda utilizarla para corregir el valor de velocidad indicado por el MM durante un proceso de calibración.

$$Y = -0,0032X^2 + 1,0164X - 0,128 \quad (2)$$

Donde X es la velocidad medida por el MM en presencia del Kestrel 4000, Y es la velocidad corregida del MM.

Por otra parte, el error porcentual de la medida del CTA cuando está presente el Tha es alrededor del 4%, por esta razón para corregir el valor de velocidad medido por el CTA cuando se está calibrando un Tha se recomienda multiplicar dicho valor por 0,959, el cual se determina mediante la ecuación 3.

$$K = (1 - E)$$

(3)

Donde E es el error porcentual generado en la medida registrada por el CTA debido a la presencia del instrumento bajo prueba (Tha) durante el proceso de calibración, K es el factor de Corrección.

3. CONCLUSIONES

- El software CFD ANSYS® 15.0 es apropiado para describir el perfil de velocidad en régimen de flujo turbulento y las obstrucciones generadas durante la experimentación.
- El modelo teórico I se ajusta de manera más apropiada a los resultados experimentales obtenidos con el medidor CTA en comparación al modelo teórico II.
- La presencia de los anemómetros rotativos ocasiona distorsión en el perfil de velocidad con errores entre el 2,5 y 5,6%, mientras la presencia del tubo Pitot tipo L causa un error menor al 1%.
- El área que ocupa el instrumento en la sección de pruebas influye significativamente en la medición registrada por el CTA debido al contacto del aire con la superficie del MUT. Para corregir el valor de velocidad medido por el MM al utilizar el túnel para calibrar equipos, se recomienda usar la ecuación 2 para la calibración de un Kestrel y multiplicar por 0,959 el valor medido por el MM cuando se esté calibrando un Tha, o un equipo de dimensiones comparables.

4. RECOMENDACIONES

- Evaluar el modelo teórico I cuando el aire se encuentre en otras condiciones de presión, temperatura, humedad relativa.

- Determinar los perfiles de velocidad en régimen turbulento con los modelos de Baldwin-Lomax, el K-Épsilon y las ecuaciones aportadas por Navier y Stokes, Nikudrase o perfil universal logarítmico, Bareblatt-Chorin universal velocity distribution, para determinar cuál de estos describe mejor el comportamiento real del flujo aire en las condiciones utilizadas durante la experimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] GARCÍA, Luis & ALFONSO, Jhon. Túnel de viento: Una solución de trazabilidad para las mediciones de velocidad de gases (Anemometría) en Colombia. *Revista Met&Flu*. 2014, nro. 9. p. 54-61. ISSN: 2145-5716.

- [2] MARTIN, Patricia; RODRÍGUEZ, Eduardo; LOREDO, Acir & CAMANO, Edith. Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en túnel de viento. *Revista de Ingeniería Electrónica Automática y Comunicaciones (RIELAC)*. 2014, nro. 35. p. 78-92. ISSN: 1815-5928.

- [3] GARCÍA, Luis; ANGARITA, Jair & NARANJO, Omar. La velocidad en gases: aspectos metroológicos. *Revista Met&Flu*. 2010, nro. 3. p. 4-24. ISSN: 2145-5716.

- [4] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. *Requisitos. NTC-ISO/IEC 17025*. Bogotá D.C: Instituto, 2005. 49 p.

- [5] Environmental Protection Agency (EPA). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement System, Vol. II; Part 1*. 2008. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, USA.

- [6] INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. *Operación de Estaciones de Medición de la Calidad del Aire, Mantenimiento y Calibración de sus Componentes. Manual 4*, [en línea]. México, 2013. p. 45. [consultado 10

- agosto 2016]. Disponible en:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/624.pdf>
- [7] INTERNATIONAL VOCABULARY OF METROLOGY (VIM). Basic and General Concepts and Associated Terms. 2nd edition, 1993.
- [8] RIU, Jordi; BOQUÉ, Ricardo; MAROTO, Alicia & RIUS, Xavier. Trazabilidad en medidas físicas mediante calibración directa: calibración de una balanza. Departamento de Química Analítica y Química Orgánica. Instituto de Estudios Avanzados. Universidad Rovira i Virgili. España, 2005. 8 p.
- [9] GONZALES, Salome; CHIROQUE, José & URCUHUARANGA, William. Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. [en línea] Perú, 2011. p. 4-8. [consultado 25 septiembre 2016]. Disponible en: http://guzlopeditoras.com/web_des/ener01/eolica/pld0442.pdf
- [10] FRIAS TARON, Ulises Javier. Diseño de un banco experimental para caracterización de aerogeneradores de baja potencia. Bucaramanga, 2011, 202 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.
- [11] LA GUÍA MetAs. Metrólogos Asociados (MetAs). Áreas de la metrología. México, 2006, Boletín nro. 6.
- [12] ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA. Acreditación nro. L0615 [en línea]. Colombia, feb. 2016 [consultado 10 agosto 2016]. Disponible en:

<http://www.onac.org.co/directorios/anexos/archivos/obj01/ALCANCESLABCA LIBRA/archivocertificado-818-184.pdf>

- [13] CORPORACIÓN CDT DE GAS, Medición de velocidad de gases. [Consultado 29 marzo 2016].
- [14] MORALES CONTRERAS, Oscar; GOMEZ ROA, Antonio & VAZQUEZ PRIETO, Raúl. Medición de perfiles de velocidad en túnel de viento. Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa [en línea]. Universidad Autónoma de baja California, 2014, nro. 02, p. 3-5. ISSN 2007-8412. Disponible en: www.pag.org.mx/index.php/PAG/article/download/211/259
- [15] CARE, I & ARENAS, M. On the impact of anemometer size on the velocity field in a closed wind tunnel. LNE – CETIAT EDF. Flow Measurement and Instrumentation. France, 2014. 9 p.
- [16] SALDARRIAGA, Juan. Hidráulica de tuberías. Colombia. McGraw Hill, 2001. ISBN: 958-600-831-2.
- [17] MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. 6 ed. México. Pearson Educación, 2006. 230-266 p. ISBN: 970-26-0805-8.
- [18] PICARD, A; DAVIS, R; GLASER, M & FUJII, K. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrología 2008. p. 149-155.
- [19] REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA [sitio Web]. Madrid: anemómetro de paletas. [Consultado 19 enero 2017]. Disponible en: <http://diccionario.raing.es/es/lema/anem%C3%B3metro-de-paletas>

- [20] WINDOOR. [Sitio Web]. España: Túnel de viento, historia y tecnología. [Consultado 10 octubre 2016]. Disponible en: <http://www.windowor-realfly.com/es/contents/:slug-3>
- [21] CORPORACIÓN CDT DE GAS. [Sitio Web]. Santander: Túnel de viento WSL 20 [Consultado 15 Agosto 2016]. Disponible en: <http://www.cdtdegas.com/index.php/tecnologia/equipos-desarrollados/36-tunel-de-viento-wsl-20>
- [22] BETANCOURT GRAJALES, Ramiro. Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento. 1ra ed. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales; 2003, 201.
- [23] ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Mecánica de fluidos. 1ra ed. México McGraw-Hill, 2006. 321-343p. ISBN: 970-10-5612-4.

BIBLIOGRAFÍA

AEROLAB. [Sitio Web]. Estados Unidos: Túnel de viento Circuito abierto y circuito cerrado. [Consultado 6 enero 2017]. Disponible en: <http://www.aerolab.com/products/closed-circuit-wind-tunnels/>

ANGARITA DELGADO, Jair Fernando. 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. Bucaramanga, 2010, 135 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander

BETANCOURT GRAJALES, Ramiro. Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento. 1ra ed. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales; 2003, 201.

BIRD, Robert Byron; STEWART, Warren; LIGHTFOOT, Edwin. Fenómenos de transporte. 2da ed. México. Limusa Wiley, 2006.175-190p. ISBN: 968-18-6365-8.

CARE, I & ARENAS, M. On the impact of anemometer size on the velocity field in a closed wind tunnel. LNE – CETIAT EDF. Flow Measurement and Instrumentation. France, 2014. 9 p.

CHICAS MOLINA, Francisco Ernesto. Diseño y construcción de un túnel de viento [En línea]. Antiguo Cuscatlán, el Salvador, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. Facultad de ingeniería y arquitectura. [Consultado 20 septiembre 2016] Disponible en: http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/tunel.pdf

CORPORACIÓN CDT DE GAS, Medición de velocidad de gases. [Consultado 29 marzo 2016].

CORPORACIÓN CDT DE GAS. [Sitio Web]. Santander: Túnel de viento WSL 20 [Consultado 15 Agosto 2016]. Disponible en: <http://www.cdtdegas.com/index.php/tecnologia/equipos-desarrollados/36-tunel-de-viento-wsl-20>

ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Mecánica de fluidos. 1ra ed. México McGraw-Hill, 2006. 321-343p. ISBN: 970-10-5612-4.

Environmental Protection Agency (EPA). Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement System, Vol. II; Part 1. 2008. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, USA.

FRIAS TARON, Ulises Javier. Diseño de un banco experimental para caracterización de aerogeneradores de baja potencia. Bucaramanga, 2011, 202 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

GARCÍA, Luis & ALFONSO, Jhon. Túnel de viento: Una solución de trazabilidad para las mediciones de velocidad de gases (Anemometría) en Colombia. Revista Met&Flu. 2014, nro. 9. p. 54-61. ISSN: 2145-5716.

GARCÍA, Luis; ANGARITA, Jair & NARANJO, Omar. La velocidad en gases: aspectos metrológicos. Revista Met&Flu. 2010, nro. 3. p. 4-24. ISSN: 2145-5716.

GONZALES, Salome; CHIROQUE, José & URCUHUARANGA, William. Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. [En línea] Perú, 2011. p. 4-8. [Consultado 25 septiembre 2016]. Disponible en: http://guzlop_editoras.com/web_des/ener01/eolica/pld0442.pdf

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Requisitos. NTC-ISO/IEC 17025. Bogotá D.C: Instituto, 2005. 49 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. Operación de Estaciones de Medición de la Calidad del Aire, Mantenimiento y Calibración de sus Componentes. Manual 4, [En línea]. México, 2013. p. 45. [Consultado 10 agosto 2016]. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/624.pdf>

INTERNATIONAL VOCABULARY OF METROLOGY (VIM). Basic and General Concepts and Associated Terms. 2nd edition, 1993.

LA GUÍA MetAs. Metrologos Asociados (MetAs). Áreas de la metrología. México, 2006, Boletín nro. 6.

MARTIN, Patricia; RODRÍGUEZ, Eduardo; LOREDO, Acir & CAMANO, Edith. Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en túnel de viento. Revista de Ingeniería Electrónica Automática y Comunicaciones (*RIELAC*). 2014, nro. 35. p. 78-92. ISSN: 1815-5928.

MORALES CONTRERAS, Oscar; GOMEZ ROA, Antonio & VAZQUEZ PRIETO, Raúl. Medición de perfiles de velocidad en túnel de viento. Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa [En línea]. Universidad Autónoma de Baja California, 2014, nro. 02, p. 3-5. ISSN 2007-8412. Disponible en: www.pag.org.mx/index.php/PAG/article/download/211/259.

MOTT, Robert. Mecánica de fluidos. 6 ed. México. Pearson Educación, 2006. 230-266 p. ISBN: 970-26-0805-8.

ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA. Acreditación nro. L0615 [En línea]. Colombia, feb. 2016 [Consultado 10 agosto 2016]. Disponible en: <http://www.onac.org.co/directorios/anexos/archivos/obj01/ALCANCESLABCALIBRA/archivocertificado-818-184.pdf>

PICARD, A; DAVIS, R; GLASER, M & FUJII, K. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrología 2008. p. 149-155.

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA [sitio Web]. Madrid: anemómetro de paletas. [Consultado 19 enero 2017]. Disponible en: <http://diccionario.raing.es/es/lema/anem%C3%B3metro-de-paletas>

RIU, Jordi; BOQUÉ, Ricardo; MAROTO, Alicia & RIUS, Xavier. Trazabilidad en medidas físicas mediante calibración directa: calibración de una balanza. Departamento de Química Analítica y Química Orgánica. Instituto de Estudios Avanzados. Universidad Rovira i Virgili. España, 2005. 8 p.

SALDARRIAGA, Juan. Hidráulica de tuberías. Colombia. McGraw Hill, 2001. ISBN: 958-600-831-2.

TOLENTINO ESLAVA, Rene. Medición de capa límite y turbulencia en un túnel de viento para calibración de instrumentos de medición de velocidad. México DF, 2003, Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional.

WINDOOR. [Sitio Web]. España: Túnel de viento, historia y tecnología. [Consultado 10 octubre 2016]. Disponible en: <http://www.windoor-realfly.com/es/contents/:slug-3>

ANEXOS

ANEXO A. INSTRUMENTOS COMÚNMENTE USADOS PARA LA MEDICIÓN DE BAJAS VELOCIDADES EN GASES (0,5 m/s A 25 m/s)

1. ANEMÓMETRO TÉRMICO

Figura 17. SCHMIDT Flow Sensor SS 20.400.



Fuente: <http://www.schmidt-sensors.com/sensor-20.400/index.html>

Su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de calor por convección forzada entre un filamento caliente y el fluido que circula alrededor. Este sensor está diseñado para uso estacionario en conductos con flujo de aire en condiciones de presión atmosférica.

El más común consiste de un hilo de platino o Tungsteno, muy fino, que se calienta unos 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 [3,13]. Existen 3 configuraciones: anemómetro de corriente constante (CCA),

anemómetro de voltaje constante (CVA) y anemómetro de temperatura constante (CTA). La ecuación 4 describe el principio de funcionamiento del instrumento.

$$V = \frac{I^2 R_0 (1 + \alpha (T_c - T_{ref}))}{A_c (T_c - T_{ref})} - a \quad (4)$$

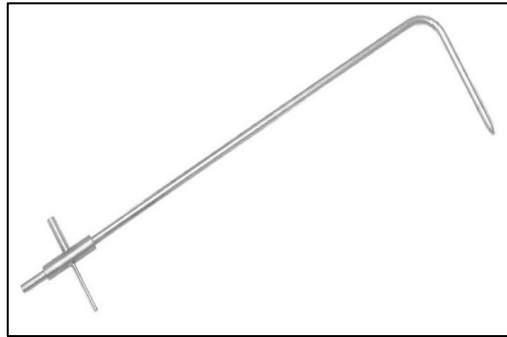
Dónde:

V	Velocidad del gas [m/s].
I	Corriente eléctrica [mA].
R ₀	Resistencia eléctrica del cable a condiciones de referencia [Ω].
α	Coefficiente lineal de resistencia térmica.
A _c	Área transversal del cable.
T _c	Temperatura del cable.
T _{ref}	Temperatura de referencia.
a-b-c	Constantes.

El anemómetro que se utilizó en la experimentación fue el de temperatura constante (CTA) con la señal de salida análoga, es decir, los resultados se obtienen en [mA] y se relacionan de forma lineal con la velocidad.

2. TUBO DE PITOT

Figura 18. PITOT L serie 160E.



Fuente: <http://www.dwyerinst.com/Product/TestEquipment/PitotTubes/Series160E>

El tubo de Pitot es un medidor de flujo de bajo costo que consiste en un tubo de pequeño diámetro con un orificio delantero, el cual se debe ubicar de tal forma que su eje central quede perpendicularmente a la dirección de la corriente de flujo [13]. Los dos tipos de tubos Pitot más usados son el tipo L y el tipo S: En el tipo L la velocidad es obtenida matemáticamente con ayuda del principio de Bernoulli, que relaciona la presión diferencial y la velocidad mediante la ecuación 5; para el tipo S el principio de operación es semejante al tipo L, pero solo cuenta con un orificio para medir la presión estática, por lo cual 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 [13]. El tubo Pitot debe estar asociado a un medidor de presión diferencial para obtener su lectura [13].

$$V = C_{pl} * \sqrt{\frac{2P_d}{\rho_{gas}}} \quad (5)$$

Dónde:

V	Velocidad del gas [m/s]
C_{pl}	Coefficiente de flujo de Pitot (aproximadamente 1)
P_d	Presión dinámica [Pa]
ρ_{gas}	Densidad del gas [kg/m ³]

3. ANEMÓMETRO ROTATIVO O DE PALETAS

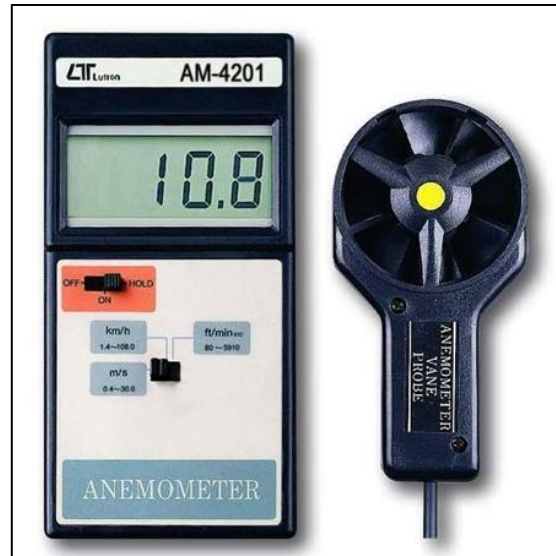
Son instrumentos desarrollados para la medición de la velocidad instantánea del aire en el ambiente o en conductos, los cuales fueron diseñados inicialmente para aplicaciones fijas, pero a través del tiempo se han convertido en uno de los anemómetros portátiles más utilizados para medir pequeñas velocidades de viento y de aire [13]. Consiste en un número de paletas radiales a partir de un eje común formando un anillo en el plano denominado rotor de turbina, colocadas para girar cuando están frente al viento haciendo que el rotor presente una velocidad angular proporcional a la velocidad del fluido [19]. Su principio de funcionamiento es mecánico, por lo tanto, la simetría, el momento de inercia y la fricción en el eje de rotación son claves para el desempeño metrológico del instrumento [13].

Los anemómetros de paletas utilizados durante la experimentación fueron el Kestrel 4000 y el Termohigroanemómetro (Tha), los cuales se muestran en la Figura 19.

Figura 19. Anemómetros rotativos.



a) Kestrel 4000



b) Termohigroanemómetro

Fuente: <https://kestrelmeters.com/products/>, <https://www.instrukart.com/anemometers/>

El Kestrel 4000 tiene la capacidad de medir la velocidad del viento, la temperatura, la sensación térmica, la humedad, el punto de rocío, la temperatura de bulbo húmedo y la altitud, además es muy práctico por su reducido tamaño, tiene almacenamiento de datos, también cuenta con cable USB que permite descargar datos al computador, frecuentemente se utiliza para monitoreo del ambiente.

El Tha está equipado con un sensor de brazo de paletas convencional con diseño de rodamientos de baja fricción, es sensible a baja velocidad del viento. Mide la velocidad del aire o el volumen, la humedad relativa y la temperatura. Se utiliza en servicio metrológico, túnel de viento, aire acondicionado, entre otras.

ANEXO B. TÚNELES DE VIENTO

Existen túneles de viento horizontales y verticales, los cuales difieren en las aplicaciones que pueden tener. Los túneles de viento horizontales son utilizados para investigación en aerodinámica, mientras aquellos que se encuentran en posición vertical se emplean para el diseño de las bombas de caída libre, mejorar los aviones en condiciones de pérdida y en el entrenamiento de paracaidistas [20].

Los túneles de viento se clasifican en dos tipos de circuito, abierto y cerrado, cuyas características se presentan en la Tabla 8. Por su parte, las configuraciones para la cámara de pruebas pueden ser de sección cerrada o abierta, las cuales se muestran en la Figura 20.

Figura 20. Configuraciones de túneles de viento.



Fuente: Medición de velocidad de gases. Corporación CDT de Gas, Santander, Colombia.

Tabla 8. Clasificación túneles de viento.

Túnel de Viento	Descripción	Ventajas	Desventajas
Circuito Abierto	El flujo de aire no se recircula dentro del túnel, por lo tanto, después de ser soplado este se escapa hacia la atmosfera.	<p>Costo de construcción menor comparado con las instalaciones de circuito cerrado.</p> <p>Posibilidad de utilizar técnicas de visualización de flujo con humo.</p>	<p>Necesita mayor acondicionamiento de flujo.</p> <p>El entorno en el que está instalado el túnel influye en las condiciones del flujo.</p> <p>Existe mayor consumo de energía.</p> <p>Contaminación acústica, por lo general este circuito es ruidoso.</p>
Circuito Cerrado	El flujo de aire es forzado a recircular en el interior del túnel.	<p>Produce menor ruido comparado con el circuito abierto.</p> <p>Requiere menor consumo de energía.</p> <p>Es posible controlar la calidad del flujo.</p> <p>Las condiciones del flujo son independientes de las condiciones del entorno en el cual se encuentra situado el túnel.</p>	<p>El costo de construcción es mayor, esto se debe a los ductos extras para el retorno del flujo.</p> <p>Si se utiliza continuamente se debe implementar un sistema de purga para evacuar la recirculación de humos.</p> <p>El aumento de la temperatura del aire puede ser un inconveniente cuando se trabaja en tiempos prolongados, por lo cual es necesario adecuar un sistema de refrigeración.</p>

Fuente: Tomado y adaptado de las referencias [21,22].

ANEXO C. REGÍMENES DE FLUJO

El flujo de un fluido puede llegar a presentar un comportamiento laminar o turbulento dependiendo de las pérdidas de energía que presente, lo cual es posible predecir si se conoce la magnitud de un número adimensional denominado número de Reynolds (Re). Este número es un parámetro adimensional que relaciona la fuerza inercial de un fluido con la fuerza viscosa a partir de cuatro variables: velocidad promedio del flujo (V), diámetro de la tubería (D), densidad del fluido (ρ), y viscosidad (μ) [17], como se muestra en la ecuación 6.

$$R_e = \frac{\rho D V}{\mu} \quad (6)$$

En la Tabla 9. Se presenta la clasificación del régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds.

Tabla 9. Clasificación del régimen de flujo.

Número de Reynolds	Régimen de flujo
$Re \leq 2000$	Flujo laminar
$2000 < Re \leq 4000$	Flujo Transitorio
$Re > 4000$	Flujo Turbulento

1. FLUJO LAMINAR

El flujo laminar es un régimen de flujo que obedece la ley de viscosidad de Newton debido a que predominan las fuerzas viscosas, haciendo que las capas de fluido se muevan unas sobre otras en dirección al flujo obteniendo líneas de corrientes suaves, cuyo resultado es un perfil parabólico de velocidad [17,23].

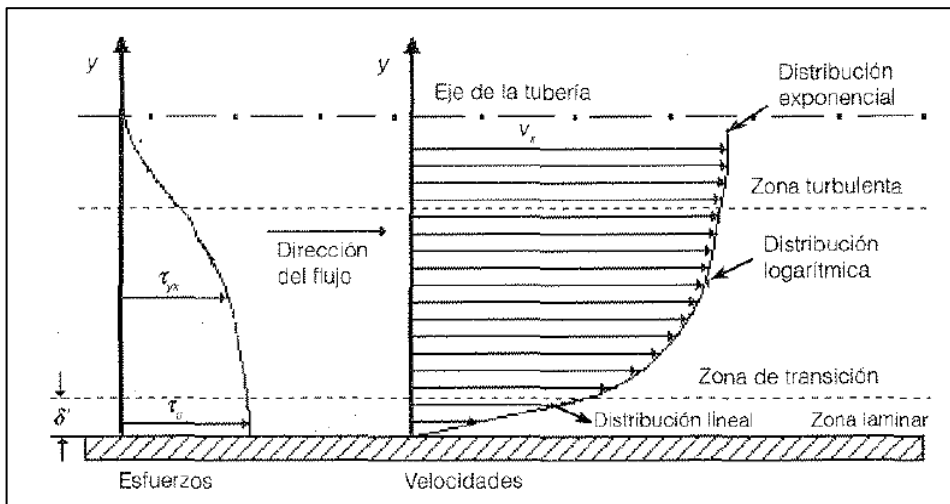
2. FLUJO TRANSITORIO

En este régimen de flujo se presenta un comportamiento intermedio entre otros dos, por lo cual se dificulta la capacidad de modelar el perfil de velocidades del fluido. Además de esto, es importante resaltar que la zona en la cual se presenta es muy pequeña, y se encuentra a una distancia de la pared que depende de las propiedades del fluido como la densidad y la viscosidad.

3. FLUJO TURBULENTO

Los esfuerzos cortantes presentes entre las fronteras del fluido y el sólido que lo contiene afecta la distribución de velocidades que en principio debería ser uniforme [16]. En un flujo de régimen turbulento se presentan tres zonas de distribución de velocidades y esfuerzos que describen su comportamiento: zona laminar, zona de transición y zona turbulenta, las cuales se muestran en la Figura 21.

Figura 21. Zonas de distribución velocidades para flujo turbulento en tubería de sección circular.



Fuente: Referencia [16].

ANEXO D. SISTEMA DE VENTILADORES

El túnel de viento WSL 20 cuenta con 7 ventiladores axiales para la generación del flujo, que opera en tres grupos independientes: dos de ellos con 3 ventiladores y el restante con 1 solo. Los grupos independientes se pueden observar en la Figura 22, cada color representa a uno de los conjuntos independientes.

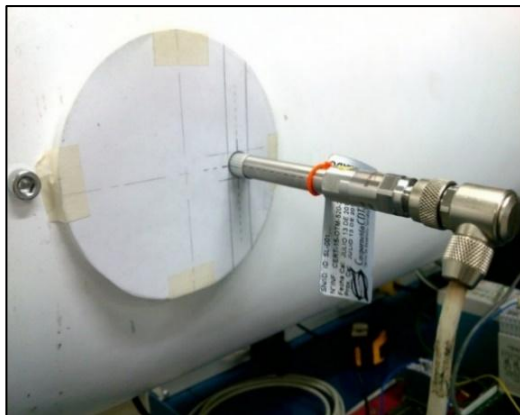
Figura 22. Esquema sistema de ventiladores del túnel de viento WSL 20.



ANEXO E. AJUSTE DEL CTA

El CTA se ajustó por medio de una guía que tiene el túnel de viento en el costado derecho, la cual fue diseñada con el fin de ubicar el sensor del CTA perpendicularmente al flujo. Ésta guía se replicó para el costado izquierdo con el objetivo de garantizar exactitud en la medición, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Guía para el ajuste del CTA en la zona de pruebas del túnel.



Ajuste del CTA en el costado derecho.



Ajuste del CTA en el costado izquierdo.

La adquisición de datos para el CTA y el tubo Pitot tipo L se obtuvieron mediante el software opto 22. Para esto, se ajustó el voltaje aplicado al túnel de viento en función de la velocidad nominal deseada de acuerdo a la Tabla 10, y se ingresaron al software los datos de velocidad nominal, periodo de muestreo, número de muestras y número de repeticiones, como se muestra en la Figura 24.

Además de esto, se empleó la herramienta del software denominada “Tendencia del flujo” para confirmar que la posición del sensor del CTA sea perpendicular con

respecto a la dirección del flujo como se muestra en la Figura 25. Posteriormente se realizó la adquisición de datos para cada uno de los experimentos como se muestra en la Figura 26, en este ejemplo se obtiene la velocidad para el CTA (MM) y para el tubo Pitot tipo L (MUT) en unidades de [mA].

Tabla 10. Fijación del Voltaje.

VELOCIDAD NOMINAL [m/s]	VOLTAJE [V]
2	0,539
8	1,535
14	2,709
18	3,563

Figura 24. Ingreso de datos al Opto 22.



Figura 25. Tendencias de flujo.

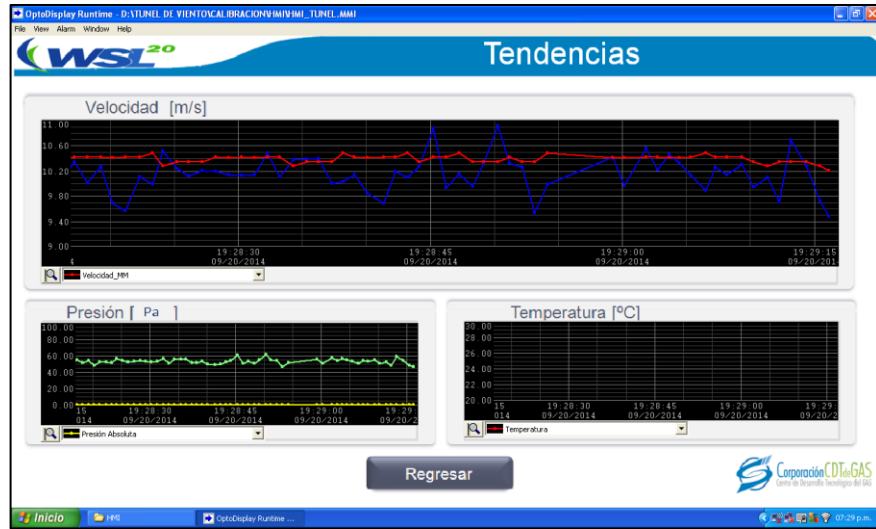


Figura 26. Resultados del Opto 22.

Corriente Promedio MM por repetición [mA]										
Punto	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5	Repetición 6	Repetición 7	Repetición 8	Repetición 9	Repetición 10
1	4.9992	4.9886	4.9843	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	4.9989	5.0221	5.0317	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	7.9982	7.9909	8.0509	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	8.1022	8.0581	8.0973	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	8.2011	8.1670	8.2089	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	11.1918	11.3840	11.3209	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.1387	11.1937	11.0997	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	13.1052	13.0022	13.0277	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	13.4092	13.3824	13.4208							
10										

OptoDisplay Runtime - D:\TUNEL DE VIENTO\CALIBRACION\HMI\HMI_TUNEL\MMI

File View Alarm Window Help



Resultados MUT

Corriente Promedio MUT por repetición [mA]

Punto	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5	Repetición 6	Repetición 7	Repetición 8	Repetición 9	Repetición 10
1	4.1553	4.1568	4.1569	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	4.1574	4.1585	4.1576	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	6.0545	6.0531	6.0533	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	6.0729	6.0641	6.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	6.0475	6.0638	6.0633	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	10.3861	10.3776	10.1555	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	10.2174	10.3155	10.3845	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	14.2536	14.1854	14.1472	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	14.1739	14.1769	14.2854							
10										

[Regresar](#)



ANEXO F. TÚNEL DE VIENTO WSL 20

El túnel de viento WSL 20 que se muestra en la Figura 27 fue diseñado con el fin de prestar el servicio de calibración de anemómetros y otros dispositivos de medición de velocidad de gases usados en la industria, la metrología y la investigación [21]. Este túnel de viento es de circuito abierto y sección cerrada, con un diámetro nominal de 12" y un diámetro de sección de pruebas de 290 [mm]; además, cuenta con un rectificador y generador de flujo [13]. El flujo de aire es generado por succión por medio de 7 ventiladores axiales y se encuentra en régimen turbulento [13].

Figura 27. Túnel de viento WSL 20.



La estructura del túnel de viento WSL 20 que se muestra en la Figura 28 permite observar que éste cuenta con las 5 secciones primordiales de todo túnel de viento:

sección de entrada, adecuación del flujo, cámara de pruebas, sección de generación y salida de flujo, además de mostrar los soportes sobre los cuales descansa el túnel de viento y la zona donde se encuentran los sistemas de control.

Figura 28. Estructura del túnel de viento WSL 20.



Fuente: Medición de velocidad de gases. Corporación CDT de Gas, Santander, Colombia.

ANEXO G. REGISTRO DE CONDICIONES AMBIENTALES

Humedad relativa %	Temperatura [°C]	Presión [hPa]
75,30	22,70	90600,0
68,20	25,50	90570,0
67,70	25,40	90520,0
74,70	22,80	90380,0
71,50	24,10	90517,5
73,30	24,50	90640,0
81,20	22,50	90530,0
81,00	22,60	90500,0
85,20	22,80	90340,0
80,20	23,10	90502,5
76,80	22,70	90600,0
75,90	25,50	90570,0
68,12	21,31	90430,0
69,52	22,02	90620,0
76,40	21,30	90540,0
69,05	22,40	90560,0
68,00	22,52	90510,0
76,60	22,90	90230,0
71,60	24,30	90230,0
71,50	23,30	90700,0
72,40	23,30	90750,0
70,50	23,80	90540,0

ANEXO H. PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO PARA LA CONVERSIÓN DE SEÑAL ANÁLOGA A VELOCIDAD

1. MODELO MATEMÁTICO PARA EL CTA

La señal de salida del CTA es análoga [mA] y se relaciona de forma lineal con la velocidad como se muestra en la ecuación 7, donde I es la corriente en [mA] y V es la velocidad del aire en m/s. En la Tabla 11 se observa con más claridad la relación (4-20 [mA] a 0-20 m/s).

$$V = m * I + b \quad (7)$$

Tabla 11. Relación lineal Corriente: Velocidad.

I [mA]	V [m/s]	m	b
4	0	1,25	-5
20	20		

2. MODELO MATEMÁTICO PARA EL TUBO PITOT TIPO L

La señal de salida del tubo Pitot es análoga [mA] y se relaciona linealmente con el diferencial de presión [Pa] como se observa en la ecuación 8, el cual se relaciona con la velocidad por medio de la ecuación 9 en función de la densidad del gas. La relación lineal entre el diferencial de presión y la corriente se observa en la Tabla 12.

$$\Delta P = m * I + b \quad (8)$$

$$V = C_{pl} * \frac{\overline{2P_d}}{\rho_{gas}} \quad (9)$$

Tabla 12. Relación lineal Corriente: Diferencial de presión.

I [mA]	ΔP [Pa]	m	b
4	0	15,53	-62,12
20	248,48		

Para el cálculo de la densidad del aire se usó la ecuación recomendada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM 2007), de acuerdo a las condiciones ambientales del laboratorio medidas durante la experimentación [18].

Para obtener el valor de la densidad es necesario determinar la fracción molar de vapor de agua (X_v) y el factor de compresibilidad (Z), cuyas expresiones se encuentran en función de la presión (P), temperatura (T) y humedad relativa (H) del sistema de trabajo [18]. El valor de las constantes utilizadas se encuentra en la Tabla 13.

$$\rho = \frac{(P * M_a)}{ZRT} \left(1 - x_v \right) \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \quad (10)$$

$$X_v = \frac{h}{100} * (\alpha + \beta * P + \gamma * t^2) * \frac{\varepsilon^{(AT^2 - BT - C - \frac{D}{T})}}{P} \quad (11)$$

$$Z = 1 - \frac{p}{p_0} \times a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + b_0 + b_1 t x_v + c_0 + c_1 t x_v^2 + \frac{p^2}{p_0^2} \times d + e x_v^2 \quad (12)$$

Para el cálculo de la viscosidad del aire a bajas presiones se utilizó la ecuación de Chapman – Enskog (13), que depende del parámetro de Lennard Jones (σ) y la función integral de colisión (Ω) [22].

$$\mu = 2,6693 \times 10^{-5} \frac{\overline{M \cdot T}}{\sigma^2 \cdot \Omega \mu} \quad (13)$$

Donde la viscosidad μ en [poise] es función de la masa molar del aire M en [g/mol], la temperatura absoluta en [K] y el parámetro de Lennard Jones (σ) conocido como el diámetro de colisión característico de cada molécula en Ångström [Å]. La función integral de colisión (Ω) es un factor de corrección de la desviación respecto al comportamiento de una esfera que depende de la temperatura adimensional [22].

Tabla 13. Constantes utilizadas en el procedimiento matemático.

Constante	Cantidad	Unidades
A	1,23788E-05	K ⁻²
B	-0,01912132	K ⁻¹
C	33,93711047	
D	-6343,1645	K
γ	0,00000056	K ⁻²
α	1,00062	
β	3,14E-08	Pa ⁻¹
a ₀	1,58123E-06	KPa ⁻¹
a ₁	-2,9331E-08	Pa ⁻¹
a ₂	1,1043E-10	K ⁻¹ Pa ⁻¹
b ₀	0,000005707	KPa ⁻¹
b ₁	-2,051E-08	Pa ⁻¹
c ₀	0,00019898	KPa ⁻¹
c ₁	-2,376E-06	
d	1,83E-11	K ⁻² Pa ⁻²
e	-7,65E-09	K ⁻² Pa ⁻²
M _a	0,02896546	Kg mol ⁻¹
M _v	0,01801528	Kg mol ⁻¹
R	8,314472	J mol ⁻¹ K ⁻¹
Cpl	1	

Fuente: Tomado y adaptado de la referencia [18].

ANEXO I. MODELOS TEÓRICOS PARA LA DESCRIPCIÓN DE PERFILES DE VELOCIDAD EN RÉGIMEN DE FLUJO TURBULENTO

1. MODELO I

El profesor de ingeniería hidráulica de la Universidad de los Andes (Colombia) Juan Saldarriaga, describe en su libro *“Hidráulica de Tuberías”* modelos desarrollados por varios autores de forma detallada para representar cada una de las regiones mostradas en la Figura 21.

1.1 ZONA LAMINAR

En esta región la magnitud del esfuerzo τ_0 tiene una tendencia constante y es descrito por la ecuación de viscosidad de Newton:

$$\tau_0 = \mu \frac{dV}{dy} \quad (14)$$

Los gradientes de velocidad en esta zona suelen ser muy grandes, y se pueden aproximar de la siguiente manera:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \frac{V_x}{y} = \nu \frac{V_x}{y} \quad (15)$$

Dónde:

V_x Promedió de la velocidad.

y Distancia de la sección transversal al interior del conducto.

ν viscosidad cinemática del fluido.

Saldarriaga menciona un término de velocidad de corte V_* que físicamente no existe, pero que permite medir la magnitud relativa del esfuerzo cortante en la superficie del conducto ejercido sobre el fluido, correspondiente a la raíz cuadrada del promedio temporal producto de las vibraciones aleatorias en los ejes x y y .

$$V_* = \frac{\overline{\tau_0}}{\rho} \frac{m}{s} \quad (16)$$

El espesor de la subcapa laminar viscosa δ' es posible calcularlo usando la siguiente expresión:

$$\delta' = \frac{11,6 \nu}{V_*} \quad (17)$$

1.2 ZONA DE TRANSICIÓN

Existe una zona de transición entre la subcapa laminar viscosa y la zona turbulenta, donde el flujo deja de ser laminar para convertirse en turbulento. Frank M. White (1994) planteó límites para la zona de transición de un flujo turbulento, que junto a la definición de Prandtl para esfuerzos cortantes permitió obtener una ecuación para la distribución de velocidades en esta zona, descrita de la siguiente manera:

$$\frac{V_x}{V_*} = \frac{1}{0,4} \ln \frac{V_* y}{\nu} + 5,47 \quad (18)$$

La anterior expresión es válida para superficies completamente lisas. Para el caso en donde la rugosidad del conducto afecta la subcapa laminar viscosa se utiliza la siguiente ecuación desarrollada por el ingeniero y físico alemán Johann Nikuradse:

$$\frac{v_x}{v_c} = \frac{1}{0.4} \ln \frac{y}{k_s} + 8,48 \quad (19)$$

Donde demostró que, aunque la distribución de velocidades seguía siendo logarítmica, esta dependía de la rugosidad absoluta k_s de la tubería.

1.3 ZONA TURBULENTA

Varios investigadores asienten que la distribución de velocidades en la región turbulenta es muy similar a la zona de transición para flujos en ductos o tuberías. Esto significa que la distribución logarítmica definida anteriormente es aplicable en esta región de flujo [16].

2. MODELO II

Se emplearon las ecuaciones 20 y 21 tomadas del libro “Mecánica de Fluidos” de Robert Mott, las cuales recomienda el autor para determinar el perfil de velocidad en régimen turbulento [17]. Estas ecuaciones están en función del factor de fricción, el cual se determina a partir de la ecuación 22 denominada ecuación de Colebrook [23], que a su vez depende del número de Reynolds y la rugosidad

relativa de la tubería. El material del tubo del túnel de viento es PVC, por lo cual se aproxima la rugosidad relativa a $\varepsilon/D = 5.1724 \times 10^{-6}$.

$$U_{m\acute{a}x} = v \left(1 + 1,43 \sqrt{f} \right) \quad (20)$$

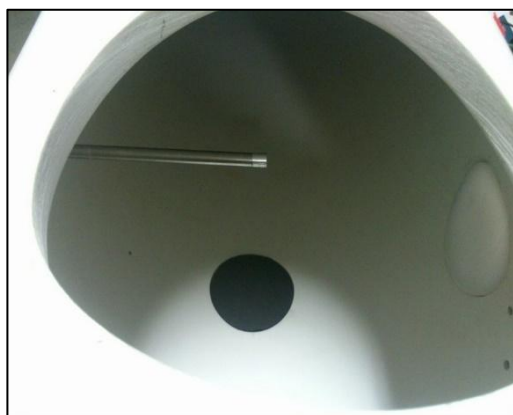
$$U = v \left(1 + 1,43 \sqrt{f} + 2,15 \sqrt{f} \log_{10} \frac{y}{r_0} \right) \quad (21)$$

$$\frac{1}{f} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (22)$$

ANEXO J. MONTAJE EXPERIMENTAL

Las Figuras 29 a 33 presentan el montaje experimental que se llevó a cabo de los instrumentos bajo prueba (MUT), que se ubicaron a 7,5 cm medidos desde la pared de la tubería de forma vertical.

Figura 29. Montaje experimental.



Montaje del CTA



Montaje del CTA y el Pitot L

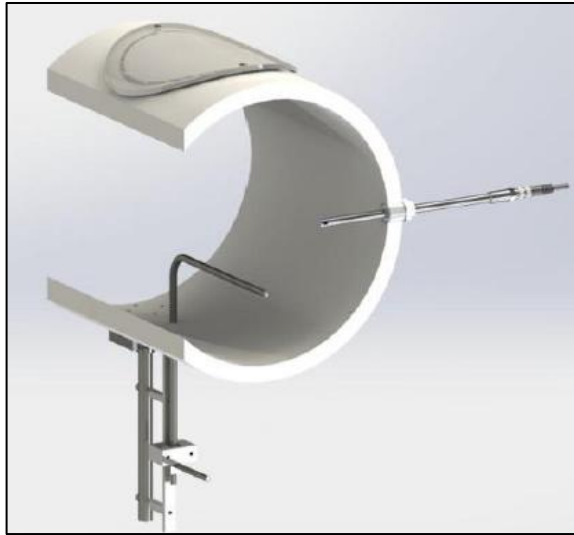


Montaje del CTA y el Kestrel 4000



Montaje del CTA y el Tha

Figura 30. Vista lateral del montaje experimental.



Fuente: Medición de velocidad de gases. Corporación CDT de Gas, Santander, Colombia.

Figura 31. Medidores bajo prueba (MUT).



Figura 32. Módulo de adquisición de datos para el CTA y el Tubo Pitot.

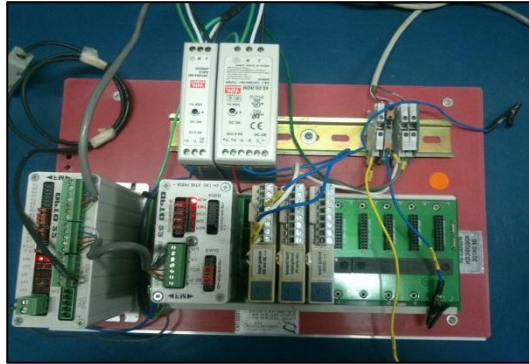


Figura 33. Transmisor Tubo Pitot L.



ANEXO K. DESVIACIÓN DEL MODELO TEÓRICO CON EL EXPERIMENTAL

En la Tabla 14 se presenta los datos experimentales, los datos obtenidos al aplicar el modelo teórico I y el error experimental absoluto, el cual hace referencia a la desviación del modelo teórico comparado con los datos experimentales.

Tabla 14. Desviación del modelo teórico I con los datos experimentales.

Posición del CTA [cm]	Teórico I				Experimental				Error experimental absoluto (%)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	2 m/s	8 m/s	14 m/s	18 m/s	2 m/s	8 m/s	14 m/s	18 m/s	2 m/s	8 m/s	14 m/s	18 m/s
0,07	1,319	5,040	8,738	11,228	1,360	5,287	9,091	11,379	3,1	4,0	4,0	1,3
3,8	1,869	7,142	12,381	15,910	1,879	7,020	11,896	15,216	0,5	1,7	3,9	4,4
7,5	1,963	7,500	13,002	16,707	1,922	7,293	12,566	16,177	2,1	2,8	3,3	3,2
10,9	2,015	7,697	13,343	17,146	2,026	7,599	13,663	17,732	0,6	1,3	2,4	3,4
14,3	2,052	7,840	13,590	17,464	2,097	8,109	14,089	17,987	2,2	3,4	3,7	3,0
14,7	2,052	7,840	13,590	17,464	2,097	8,152	13,923	17,930	2,2	4,0	2,4	2,7
18,1	2,015	7,697	13,343	17,146	2,001	7,678	13,804	17,742	0,7	0,2	3,5	3,5
21,5	1,963	7,500	13,002	16,707	1,914	7,248	12,625	16,367	2,5	3,4	2,9	2,0
25,2	1,869	7,142	12,381	15,910	1,842	6,922	11,974	15,392	1,5	3,1	3,3	3,3
28,93	1,319	5,040	8,738	11,228	1,360	5,268	8,714	11,297	1,2	4,5	0,3	0,6

En la Tabla 15 se presenta los datos experimentales, los datos obtenidos al aplicar el modelo teórico II y el error experimental absoluto, el cual hace referencia a la desviación del modelo teórico comparado con los datos experimentales.

Tabla 15. Desviación del modelo teórico II con los datos experimentales.

Posición del CTA [cm]	Teórico II				Experimental				Error experimental absoluto (%)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	2 m/s	8 m/s	14 m/s	18 m/s	2 m/s	8 m/s	14 m/s	18 m/s	2 m/s	8 m/s	14 m/s	18 m/s
0,07	0,862	3,812	6,901	9,025	1,360	5,287	9,091	11,379	57,8	38,7	31,7	26,1
3,8	1,901	7,234	12,524	16,086	1,879	7,020	11,896	15,216	1,1	3	5	5,4
7,5	2,077	7,816	13,482	17,287	1,922	7,293	12,566	16,177	7,5	6,7	6,8	6,4
10,9	2,175	8,136	14,008	17,948	2,026	7,599	13,663	17,732	6,8	6,6	2,5	1,2
14,3	2,245	8,369	14,390	18,428	2,097	8,109	14,089	17,987	6,6	3,1	2,1	2,4
14,7	2,245	8,369	14,390	18,428	2,097	8,152	13,923	17,930	6,6	2,6	3,2	2,7
18,1	2,175	8,113	13,969	17,899	2,001	7,678	13,804	17,742	8	5,4	1,2	0,9
21,5	2,077	7,792	13,443	17,239	1,914	7,248	12,625	16,367	7,9	7	6,1	5,1
25,2	1,901	7,210	12,486	16,037	1,842	6,922	11,974	15,392	3,1	4	4,1	4
28,93	0,862	3,788	6,862	8,976	1,360	5,268	8,714	11,297	57,8	39	27	25,9

ANEXO L. ANÁLISIS POR BLOQUES

Tabla 16. Datos del análisis por bloques.

2 m/s										
	0,07	3,8	7,5	10,9	14,3	14,7	18,1	21,5	25,2	28,93
	1,3603	1,8791	1,922	2,0259	2,0966	2,097	2,0005	1,914	1,8423	1,335
	1,3599	1,8836	1,9263	2,0325	2,1006	2,1081	2,0057	1,9214	1,8412	1,347
	1,3678	1,9413	2,005	2,0079	2,1218	2,0826	2,0224	1,9893	1,9307	1,3774
	1,429	1,946	2,03	2,096	2,15	2,121	2,069	2,029	1,903	1,461
Y.j.	75,079	286,27	502,22	647,15						
Y..k	113,71	148,12	155,01	166,94	173,1	172,12	167,05	155,14	147,39	112,05

8 m/s										
	0,07	3,8	7,5	10,9	14,3	14,7	18,1	21,5	25,2	28,93
	5,2874	7,0202	7,2927	7,5986	8,1092	8,1517	7,6781	7,2478	6,9218	5,2677
	5,364	7,0267	7,3052	7,6351	8,2065	8,2368	7,6876	7,2529	6,9338	5,2833
	5,5495	7,1794	7,5118	7,695	8,2614	8,2065	7,6982	7,4472	7,1015	5,517
	5,5224	7,2134	7,475	7,8335	8,4759	8,3137	7,8309	7,3435	7,0688	5,5203
		Y...	1510,73							

14 m/s										
	0,07	3,8	7,5	10,9	14,3	14,7	18,1	21,5	25,2	28,93
	9,090	11,896	12,566	13,663	14,089	13,923	13,804	12,624	11,974	8,714
	9,105	11,945	12,620	13,668	14,109	13,994	13,813	12,669	11,989	8,93
	9,772	12,637	13,09	14,032	14,792	14,557	14,046	13,124	12,401	9,750
	9,776	12,593	13,020	14,386	14,757	14,684	14,435	13,021	12,419	9,734

18 m/s											
	0,07	3,8	7,5	10,9	14,3	14,7	18,1	21,5	25,2	28,93	Yi..
	11,978	15,215	16,177	17,732	17,986	17,929	17,741	16,366	15,392	11,297	369,212
	11,901	15,356	16,213	17,778	17,992	17,972	17,741	16,399	15,425	11,755	370,840
	12,426	16,175	16,919	18,385	19,019	18,823	18,134	16,865	16,065	12,342	384,376
	12,421	16,216	16,939	18,376	18,891	18,918	18,343	16,929	16,186	12,422	386,304

**ANEXO M. VELOCIDAD REGISTRADA POR LOS INSTRUMENTOS EN LA
POSICIÓN 7,5 cm**

Tabla 17. Velocidad registrada por el MM y el MUT en la posición 7,5 cm.

Medidor	2 m/s		8 m/s		14 m/s		18 m/s	
	CTA	MUT	CTA	MUT	CTA	MUT	CTA	MUT
Pitot tipo L	1,926	2,197	7,305	7,580	12,620	13,770	16,214	17,300
Kestrel 4000	2,030	1,933	7,474	7,167	13,020	12,700	16,939	16,333
Tha	2,005	1,700	7,511	6,500	13,090	11,767	16,919	15,267