### Numero 12 | Año 2016

Publicación anual de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

# **Banco gravimétrico** para la calibración de medidores de líquidos



**ISSN** 2145-5716





## **COMPROMETIDOS CON LA FORMACIÓN,** LA APLICACIÓN DE CONDCIMIENTO, EL DESARROLLO TECNOLÓGICO Y LA INNOVACIÓN

Investigación y Desarrollo de Tecnología

Servicios de Calibración y Ensayo Acreditados Formación de Talento Humano

> Servicios de Ingeniería para Dil&Gas

Inspección de Sistemas de Medición

Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS

Para mayor información acerca de cualquiera de nuestras actividades y servicios, lo invitamos a visitar www.cdtdegas.com, o comunicarse al correo *administrador@cdtdegas.com* 



# Contenido

### **Editorial**

### Ciencia

Simulación computacional del efecto de la temperatura sobre microcaudales de nitrógeno a través de tubos capilares

Brayan Steven Moreno Caballero / Jose Luis Valderrama Torres / Elizabeth Ayala Blanco / Jhon Freddy Alfonso Serrano. 06

### Ciencia

Comparación de modelos teóricos para caracterización del régimen turbulento en el túnel de viento WSL20 del CDT de Gas

Edison	Gerardo	Granados	Avellaneda /	Carolina Madolet	Pinto.	12
		• • • • • • • • • • • • •			• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	13

### Tecnología

Banco gravimétrico para la calibración de medidores de líquidos

Diego Antonio Manrique Moreno / Ferney David Antolinez Tobo.	25
•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	43

#### EDITOR GENERAL /

Carlos Eduardo García Sánchez, Ph.D. Líder Área de Innovación - CDT de Gas

#### COMITÉ EDITORIAL/

Henry Abril Blanco Director - CDT de Gas

Jose Augusto Fuentes Osorio Líder Centro de Metrología de Fluidos - CDT de Gas

Luis Eduardo García Sánchez Gerente - Inline Fluid Systems

Arlex Chaves Guerrero, Ph.D. Docente e Investigador - Universidad Industrial de Santander

Juan Manuel Ortiz Afanador Gerente - Polygon Energy

Dionisio Antonio Laverde Cataño, Ph. D. Docente e Investigador - Universidad Industrial de Santander

#### DISEÑO/

María Inés Varela Peña Diseñadora Gráfica Publicitaria

Met&Flu (ISSN: 2145-5716) es una revista con periodicidad anual editada por la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas), que presenta resultados de trabajos investigativos originales, escritos de revisión y artículos de reflexión relacionados con ciencia, tecnología, innovación, regulación y normatividad, y está orientada tanto a los sectores académico y científico como al sector industrial.

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. Sede Administrativa: Carrera 23 # 106-08, Bucaramanga, (57) +7 6915244 / 6915493. Laboratorios: Parque Tecnológico UIS Guatiguará, Piedecuesta, (57) +7 6543800 / 6542266. http://www.cdtdegas.com

Descargo de responsabilidad: Las afirmaciones y opiniones que aparecen en Met&Flu son exclusiva responsabilidad de los respectivos autores, y la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas no se hace responsable por ellas. Ni el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, ni el Comité Editorial, ni los Revisores, pueden ser responsabilizados por errores o cualquier consecuencia producto del uso de la información contenida en esta publicación. La presentación de publicidad en la revista no implica respaldo ni aprobación por parte del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas ni por parte del Comité Editorial.

#### Versión on-line:

http://www.cdtdegas.com/index.php/nuestrarevista

# **Editorial**

El sector energético colombiano se encuentra en tiempos muy dinámicos. La política energética estatal y los diversos actores privados han emprendido múltiples acciones encaminadas principalmente al incremento de la diversidad y la seguridad de la canasta energética nacional.

Se puede considerar que el incremento de la capacidad de producción de energía por medio de hidroeléctricas se ha convertido en el elemento central de la dinámica, con múltiples proyectos en desarrollo y recientemente inaugurados que prometen brindarle seguridad energética al país. La elevada participación de la energía hídrica en la generación de electricidad en Colombia es muy positiva en cuanto a precio de la energía y a emisiones de gases de efecto invernadero, pero no está exenta de inconvenientes: debido a los ciclos climáticos de Colombia, particularmente por la ocurrencia del fenómeno del Niño, es bien sabido que las hidroeléctricas requieren un fuerte respaldo de otras fuentes.

El gas natural se ha consolidado como un respaldo fundamental para la generación de energía eléctrica, y por esta razón (y adicionalmente por la ausencia de grandes descubrimientos de gas en muchos años) se ha construido la primera planta de regasificación en Cartagena, y está abierto un debate respecto a la necesidad de construir una segunda en el Pacífico. Este tipo de plantas permite la importación de gas natural licuado en momentos puntuales en que se requiera, permitiendo mantener el abastecimiento eléctrico en periodos de sequía. Por otra parte, la diversificación de la canasta energética se ha orientado al incremento de la participación de fuentes de energía renovables, particularmente las denominadas "no convencionales" (FNCE). Las acciones han estado dirigidas por la Ley 1715 de 2014, que estableció instrumentos de promoción y desarrollo de las FNCE, y complementadas por resoluciones posteriores de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Datos recientes de la UPME muestran que se han aprobado más de un centenar de proyectos de FNCE, la gran mayoría de tipo solar fotovoltaica, aunque destacando una decena de proyectos de energía eólica que representan la mayoría de producción de energía del conjunto, superando los 900 MW estimados.

Uno de los instrumentos más interesantes es la Resolución 240 de 2016 de la CREG, que establece normas para la comercialización de biogás y biometano como servicio público domiciliario. Esta resolución abre la puerta desde el punto de vista legal para el desarrollo de proyectos de producción y tratamiento de biogás de mayor escala, lo cual representa una oportunidad bastante interesante para Colombia teniendo en cuenta el enorme potencial energético de la biomasa en el país. Pasando a asuntos puramente editoriales, la revista Met&Flu tendrá dos cambios significativos a partir del presente número, relacionados con la periodicidad y con el medio.

La primera modificación que entra en vigencia a partir del número 12 consiste en un cambio en la periodicidad de la revista, convirtiéndose en una publicación anual (anteriormente, la revista era semestral). Esta decisión fue tomada con base en cuestiones logísticas y de contenido, manteniendo ante todo el compromiso de calidad en los escritos que se publican. De esta manera, el presente número corresponde al año 2016, y el número 13 será la publicación del año 2017.

La segunda novedad que se introduce desde este número es la migración a publicación únicamente electrónica, abandonando la impresión física de los ejemplares. Este cambio se fundamenta en el hecho de que la versión electrónica ha demostrado un nivel de audiencia muy superior al de la versión impresa. Adicionalmente, resulta responsable desde el punto de vista ambiental centrarse sólo en la divulgación de la revista a través de internet.

Como es habitual, expresamos nuestro reconocimiento y agradecimiento a los pares revisores, por su aporte a la evaluación y mejora de los contenidos.

CARLOS E GARCÍAS

**Carlos Eduardo García Sánchez, Ph.D.** Editor General - Revista Met&Flu

### SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE MICROCAUDALES DE NITRÓGENO A TRAVÉS DE TUBOS CAPILARES

### Brayan Steven Moreno Caballero<sup>1</sup>, Jose Luis Valderrama Torres<sup>\*1</sup>, Elizabeth Ayala Blanco<sup>2</sup>, Jhon Freddy Alfonso Serrano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Industrial de Santander. Cra 27 Calle 9. Bucaramanga, Santander, Colombia.
 <sup>2</sup> Grupo de investigación en Fluidos y Energía GIFE. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio. Piedecuesta, Santander, Colombia.

**Resumen:** La temperatura es un factor que pueden influenciar de manera directa los flujos en la preparación de mezclas gaseosas de calibración mediante procesos de mezclado dinámico. En el presente artículo se presenta una simulación en el software comercial COMSOL Multiphysics, con el fin de estudiar el efecto de la temperatura en los flujos de nitrógeno a través de capilares; además se hace una comparación entre el modelo teórico y los resultados de la simulación. Los resultados generados por la simulación muestran comportamientos similares para cada uno de los capilares y permiten apreciar que aumentos en la temperatura provocan la disminución del caudal, por lo que se concluye que es necesario implementar un control de temperatura en el dispositivo generador de trazas.

#### Palabras clave: Microfluídica, capilares, microflujo, temperatura, simulación.

**Abstract:** Temperature is a factor that can influence directly the flows in the preparation of calibration gaseous mixtures in a dynamic mixture. This article presents a simulation in the commercial software COMSOL Multiphysics, in order to study the temperature's effect in the nitrogen flows through capillaries. Also, the theoretical model and the simulation's results are compared. Results of the simulation show similar behaviors for each capillary and allow appreciate that temperature causes a flow diminution, therefore it is concluded that it is necessary to implement a temperature control in the trace generator device.

Keywords: microfluidics, capillary, microflow, temperature, simulation.

\*sejovato@gmail.com

Simulación computacional del efecto de la Temperatura sobre microcaudales de nitrógeno a través de tubos capilares.

Ciencia

#### INTRODUCCIÓN

La microfluídica es un campo multidisciplinar que comprende diversas áreas como la ingeniería, física, química, microtecnología y biotecnología, que se ha desarrollado desde el principio de los años 80. Estudia el comportamiento de los fluidos en la microescala y mesoescala, permitiendo comprender el diseño de sistemas con cantidades pequeñas de fluidos. Mejoras en la fabricación de equipos para microflujos tales como microbombas, micro válvulas y microintercambiadores de calor, entre otros, han permitido un desarrollo acelerado de la microfluídica en la última década [1]. La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) ha incursionado en el desarrollo de dispositivos microfluídicos con el diseño e implementación de un Dispositivo Generador de Trazas (DGT), el cual mediante un sistema de microcapilares permite diluir materiales de referencia generando mezclas gaseosas con pequeñas trazas del material. Estas mezclas son usadas para calibrar dispositivos analizadores de gas, sin la necesidad de utilizar grandes cantidades de materiales de referencia, los cuales poseen un valor económico bastante alto.

Durante el desarrollo del dispositivo se implementaron modelos matemáticos para obtener los parámetros básicos de funcionamiento. Sin embargo, es necesario estudiar algunos factores externos que pueden modificar el comportamiento de los microflujos dentro de los capilares. Uno de los principales factores a estudiar es la temperatura, ya que ésta variable es de vital importancia cuando se trabaja con gases, puesto que puede generar cambios en la densidad del gas, y por ende en el flujo del mismo provocando así una modificación en los parámetros establecidos para el generador.

#### METODOLOGÍA

Para realizar el estudio de la influencia de los cambios de temperatura en los microflujos que atraviesan el sistema de capilares del DGT, se usó la mecánica computacional de fluidos aplicada en el software comercial COMSOL MULTIPHYSICS, el cual permite simular problemas de mecánica de fluidos y analizar los fenómenos físicos que ocurren en los mismos.

La metodología de simulación de COMSOL MUL-TIPHYSICS se divide en tres etapas las cuales son premodelamiento, modelamiento y resultados [2]. A continuación se muestra en resumen el desarrollo de estas etapas y sus subprocesos:

#### 1. Premodelamiento

La etapa de premodelamiento es la etapa inicial de la simulación en donde se define el sistema que se va a trabajar, estableciendo sus parámetros y su estructura en el espacio.

#### 1.1 Selección de parámetros:

Se definen los parámetros que representan las condiciones del sistema. Para este caso, son el radio del capilar, las temperaturas (10, 20, 30 y 40 °C) y las presiones en la entrada y en la salida del sistema de capilares, así como también la rugosidad del tubing y la rugosidad de los capilares según el fabricante (IDEX Health & Science).

#### 1.2 Elaboración de la geometría:

Una vez definidos los parámetros a utilizar, se construyó la geometría de trabajo, que es una representación virtual del sistema de capilares del dispositivo dilutor, el cual se puede apreciar en la **Figura 1.** 



**Figura 1.** Sistema de capilares del dispositivo dilutor de gases. (1) Capilar de 50  $\mu$ m, (2) Capilar de 75  $\mu$ m, (3) Capilar de N<sub>2</sub> de 250 mm.

Como se puede apreciar, el sistema de capilares del dilutor consta de tres líneas de flujo. Sin embargo, para ésta simulación se construyó una sola línea de tubería debido a que al parametrizar el radio del capilar el software permite simular cualquiera de las tres líneas (25, 50 o 75 µm) con una sola geometría. Ésta se construyó con la aplicación de construcción de sólidos con la que cuenta COMSOL (Model Wizard), que permite construir geometrías en una, dos o tres dimensiones. Se seleccionó una geometría 1D axisymmetric, puesto que simular la geometría completa del sistema presenta gran dificultad especialmente por la capacidad de cómputo necesaria para que el programa realice los cálculos, y además la geometría 3D del sistema consta de formas cilíndricas simétricas.

Para generar la geometría 1D del sistema se dibujó una línea que representa el microflujo de nitrógeno dentro del *tubing* y se seccionó en tres partes la primera representa la tubería de entrada de diámetro constante (2,159 mm), la segunda representa el capilar y la tercera la tubería de salida del sistema que tiene las mismas características de la tubería de entrada.

#### 2. Metodología:

En esta etapa se asignan los valores de las propiedades físicas y químicas, las condiciones de frontera y el mallado, permitiendo especificar más el sistema de trabajo.

#### 2.1 Materiales:

Se definió el fluido de trabajo; en éste caso de estudio el fluido es nitrógeno, por lo que se seleccionó dicho elemento de la biblioteca de materiales con la que cuenta el *software*, que contiene las propiedades del gas.

En cuanto a los materiales del *tubing* de alimentación y los capilares, son Peek (polieteretercetona) y PeekSil (combinación entre polieteretercetona y una capa interna de gel de sílice). La **Figura 2** muestra el capilar y las fases de los materiales que lo componen.



Figura 2. Capilar de PeekSil [3]. (1) Peek, (2) PeekSil.

#### 2.2 Definición física:

En esta parte del modelamiento se define físicamente el sistema, especificando sus fronteras y componentes estructurales. En este caso los componentes estructurales son el fluido y el tubing, y las fronteras del sistema son la entrada y salida del tubing, es decir, los extremos de la línea que representa la geometría. Teniendo definidas estructura y fronteras, se procede a ingresar las propiedades de las mismas. En este caso, el fluido es nitrógeno en estado gaseoso, el material de la tubería de alimentación es Peek, el capilar se define como sílice (capa del capilar que está en contacto directo con el fluido) con una rugosidad de 0,001 µm, las fronteras son los extremos de la línea, la entrada con una presión parametrizada y la salida con una presión constante de 18 psia.

#### 2.3 Mallado:

El mallado refiere al conjunto de elementos finitos que se usan para representar el cuerpo que se desea simular, que en este caso son los capilares y el *tubing* de alimentación. Este tipo de mallado no presenta ninguna dificultad puesto que la geometría del sistema es bastante sencilla además de ser 1D *axisymmetric* por lo que se genera automáticamente, y sólo se especifica que sea de alta precisión, siendo esta una de las facilidades del software.

#### 2.4 Resultados de la simulación:

Esta es la parte final de la simulación en donde se muestra la solución del modelamiento ya sea en forma gráfica o tabulada, para este caso se usó la forma tabulada indicando que los parámetros a mostrar fueran temperatura del sistema, presiones (entrada y salida) y flujo másico a la salida de la línea para así poder exportar los datos a una hoja de cálculo y realizar el respectivo análisis.

Se realizaron dos simulaciones, en la primera el sistema analizado fue solo el capilar con el objetivo de estudiar si el simulador arrojaba resultados que correspondieran a los calculados teóricamente con la norma ISO 6145-5. La segunda simulación tomó como sistema de estudio todo el recorrido del gas a través del sistema de capilares, el cual consiste en un trayecto inicial de *tubing* de 150 mm de longitud, una válvula que regula el flujo y enlaza el *tubing* al capilar ya sea de 25, 50 o 75 µm de diámetro, seguido de un punto que ensambla al capilar con el *tubing* de salida el cual mide 50 mm de longitud. El *tubing* de entrada y salida tiene un mismo diámetro (2,159 mm).

#### RESULTADOS

Para verificar la confiabilidad de la simulación en COMSOL primero se realizó una comparación entre los datos obtenidos en la primera simulación (solo el capilar) y los calculados mediante la ecuación de la norma ISO 6145-5 (Ecuación 1); dicha comparación se muestra en la **Tabla 1**. Los datos obtenidos en la segunda simulación muestran el caudal en relación a la temperatura para una línea completa de flujo, es decir las líneas de tubing y el capilar con diámetro de 25, 50 y 75 µm y 50 mm de longitud.

$$Q_{mt} = \frac{\pi * D^4 * (P_{in} - P_{out}) * \overline{\rho}}{128 * L * \mu}$$
(1)

Temperatura [°C]	Presión entrada P <sub>in</sub> [psia]	Presión salida <i>P<sub>out</sub> [</i> psia]	Q <sub>mt</sub> ISO 6145-5	Q <sub>mt</sub> COMSOL	ERROR [%]
20	88	18	0,3159211175	0,3159205110	-0,0002
20	78	18	0,2707895293	0,2707886004	-0,0003
20	68	18	0,2256579411	0,2256566898	-0,0006
20	58	18	0,1805263529	0,1805247792	-0,0009
20	48	18	0,1353947647	0,1353928686	-0,0014
20	38	18	0,0902631764	0,0902609580	-0,0025
20	28	18	0,0451315882	0,0451290474	-0,0056

Tabla 1. Comparación de datos COMSOL vs ISO 6145-5. Fuente: Autores.

Para cada capilar se realizó una gráfica que muestra la variación del flujo másico consecuente al cambio en la temperatura, esto se puede observar en las **Figuras 3, 4 y 5.** 



**Figura 3.** Caudal másico vs. Temperatura, Capilar 25 μm x 50 mm. Fuente: Autores.





**Figura 4.** Caudal másico vs. Temperatura, Capilar 50 µm x 50 mm. Fuente: Autores.

**Figura 5.** Caudal másico vs. Temperatura, Capilar 75 μm x 50 mm. Fuente: Autores.

#### DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos, se pudo apreciar que efectivamente los cambios de temperatura tienen efecto sobre los microflujos másicos de gas a través de los capilares. Debido al incremento en la temperatura del sistema los microflujos mostraron una tendencia a disminuir, dicho cambio se debe a variaciones en la temperatura que causan cambios en la viscosidad del gas convirtiéndola en una fuente de incertidumbre [4].

El cambio en la viscosidad producto del cambio de temperatura se debe a que en los gases las moléculas poseen un amplio campo de movilidad y comúnmente se encuentran alejadas por lo que la cohesión entre ellas es baja, pero ante un incremento de temperatura la interacción entre moléculas aumenta, así como también los choques de éstas contra las paredes del recipiente que contiene al gas incrementando así su resistencia a fluir. Para este caso, las variaciones del flujo con respecto a la temperatura presentan un comportamiento aproximadamente lineal, decreciendo progresivamente y a una razón de cambio casi constante. La razón de decrecimiento del caudal aumentó a medida que incrementa el diámetro del capilar es decir que se observó una mayor disminución del caudal en el capilar más grande (75  $\mu$ m) y una menor en el más pequeño (25  $\mu$ m), debido a que el aumento del diámetro de un capilar, disminuye la cantidad de material, facilitando así la transferencia de energía en forma de calor, lo cual incrementa la temperatura del fluido (nitrógeno) [5].

#### **CONCLUSIONES**

La temperatura es una magnitud que afecta el flujo a través de los capilares en la preparación de mezclas de gases de calibración por dilución dinámica, y por lo tanto es necesario controlarla.

El método de control de caudal a través de un sistema de microcapilares permite obtener diluciones con proporciones volumétricas de hasta 1:10000, con bajos niveles de incertidumbre [6]. Además es una opción económicamente viable y bastante flexible a la hora de su ejecución, puesto que si se desea hacer regulaciones de flujo diferentes, sólo se necesita realizar un cambio de capilar y controlar adecuadamente las presiones en el sistema.

La simulación por medio de COMSOL permite solucionar el sistema de ecuaciones, que describe el sistema de manera rápida haciendo un análisis en 2D y con bajos porcentajes de error, debido a que COMSOL realiza los cálculos usando las ecuaciones de Navier-Stokes las cuales se aplican a cada en el campo de flujo y por lo tanto permiten resolver los detalles del flujo en todas partes en el dominio del flujo [7]. Además de obtener aproximaciones a los valores teóricos, COMSOL permitió analizar los efectos del cambio de temperatura que hasta ahora no se habían podido estudiar por la falta de un control de temperatura en el equipo.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Javadi, A. Drops and jets of complex fluids. UvA-DA-RE (Digital Academic Repository), Universidad de Ámsterdam, Ámsterdam; 2013.

[2] Montes R. Aplicación del programa COMSOL multiphysics en la Ingeniería Mecánica. Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira; 2015.

[3] IDEX Health & Science. 6505 - PEEKsil<sup>™</sup> Tubing 1/16 [Figura] recuperado de https://www.idex-hs.com/ peeksiltm-tubing-1-16-od-x-50-m-id-x-5cm-5-pack.html

[4] International Organization for Standarization. 2009. Gas analysis-Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods-Part 5: Capillary calibration devices, ISO 6145-5.

[5] Zhizhao C, Teck NW, Nam-Trung N. Heat transfer in plug flow in cylindrical microcapillaries with constant surface heat flux. International Journal of Thermal Sciences 2013; 64: 204–212.

[6] International Organization for Standarization. 2003. Gas analysis-Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods-Part 1: Methods of calibration, ISO 6145-1.

[7] Çengel Y, Cimbala J. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones (1ra ed.), McGraw-Hill; 2007.

### COMPARACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN TURBULENTO EN EL TÚNEL DE VIENTO WSL20 DEL CDT DE GAS

Edison Gerardo Granados Avellaneda<sup>1</sup>, Carolina Madolet Pinto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander. Carrera 27 Calle 9. Bucaramanga, Santander, Colombia.

**Resumen:** La mayoría de los flujos gaseosos que se encuentran en múltiples aplicaciones ingenieriles se caracterizan por ser turbulentos, en los cuales el movimiento del fluido se da en forma caótica. Aunque existen innumerables investigaciones realizadas en esta área, la teoría del flujo turbulento aún no se ha desarrollado totalmente, por lo cual es complicado determinar el perfil de velocidad con alta exactitud.

Por esta razón se decidió realizar el presente estudio, cuyo objetivo es evaluar modelos teóricos existentes para predecir perfiles de velocidad en régimen turbulento al interior de conductos cerrados de sección circular, y a su vez validar el comportamiento de los perfiles de velocidad obtenidos experimentalmente por flujos de aire dentro del túnel de viento WSL20 desarrollado por la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) con modelos teóricos para caracterización del régimen turbulento.

El modelo teórico I se ajustó a los datos obtenidos experimentalmente con errores entre el 1 y 4 %, mientras que el modelo teórico II obtuvo una desviación significativa en la zona cerca a la pared de la tubería (zona laminar) con errores entre el 26,1 y 57,8 %; sin embargo, en la zona de turbulencia se obtuvieron errores que oscilan entre el 1 y 8 %.

Palabras clave: Túnel de viento, régimen de flujo turbulento, perfil de velocidad.

**Abstract:** Most of the gaseous flows found in multiple engineering applications are characterized for being turbulent, the movement of the fluid happens in chaotic form. Although there are many investigations in this area, the turbulent flow theory hasn't been developed completely, making it difficult to determine the velocity field with high accuracy.

For this reason, the objective in the present study is evaluate existing models to predict turbulent velocity field with closed circular section ducts, and validate the behavior of velocity fields obtained experimentally by air flows within the WSL20 wind tunnel developed by the Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) with models for characterization of the turbulent regime.

The model I was adjusted to the experimental data with errors between 1 and 4 %, while the model II obtained a significant deviation in the area near the wall of the wall (laminar zone) with errors between 26,1 and 57,8 %; however, errors ranging from 1 to 8 % were obtained in the turbulence zone.

Keywords: Wind tunnel, turbulent regime, velocity field.

\*carito\_2524@hotmail.com



#### INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de túneles de viento han permitido generar avances importantes en la medición de velocidad en gases, variable requerida para el estudio de diversas aplicaciones a nivel industrial e investigativo. En un túnel de viento es posible analizar distintos fenómenos asociados principalmente con la aerodinámica y la mecánica de fluidos. 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 área a diversas condiciones de velocidad [1]. A su vez, los túneles de viento permiten modelar situaciones reales a menor escala, teniendo en cuenta modelos teóricos y conceptos desarrollados para condiciones en régimen laminar, y valores empíricos en situaciones más complejas como el régimen turbulento, dando cabida a las teorías fundamentales de la mecánica de fluidos desarrolladas por Reynolds, Darcy y Bernoulli.

La elaboración y diseño de estas instalaciones debe contar con las secciones necesarias que garanticen un flujo uniforme y desarrollado en la sección de pruebas operable en un intervalo de velocidad determinada [2]. Previamente a la puesta en marcha de la instalación, la caracterización del túnel de viento es una fase indispensable que permite corregir y predecir el desempeño del mismo, ya que es allí donde se conocen las caídas de presión, los perfiles de velocidad y las turbulencias presentes en el interior de la sección de pruebas.

El siguiente estudio tiene como objetivo evaluar modelos teóricos existentes para predecir perfiles de velocidad de fluido en régimen turbulento al interior de conductos cerrados de sección circular. Para ello, se generaron flujos de aire dentro del túnel de viento WSL20 desarrollado por el CDT de Gas (ver **Figura 1**); donde se usó como patrón de referencia un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante (CTA) para determinar la velocidad del aire, y a su vez, se validó el comportamiento de los perfiles de velocidad obtenidos experimentalmente con modelos teóricos de mecánica de fluidos a partir de su desviación.



Figura 1. Túnel de viento WSL 20. Fuente: Corporación CDT de Gas.

#### 1. Caracterización de los perfiles de velocidad

La adquisición de datos para el CTA tiene salida análoga en corriente, con valores entre 4 y 20 mA, señal que se relaciona linealmente con la velocidad de operación del túnel en un rango de 0 a 20 m/s respectivamente. De esta manera se logra la conversión de la señal análoga que registra el anemómetro, en unidades de velocidad para determinar los respectivos perfiles de velocidad.

#### 2. Regímenes de flujo

#### - Número de Reynolds:

Un fluido puede tener 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). El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional que relaciona la fuerza inercial de un fluido con la fuerza viscosa a partir de cuatro variables: la velocidad promedio del flujo (V), el diámetro de la tubería (D), la densidad del fluido, y su viscosidad ( $\mu$ ) [3]

$$R_e = \frac{\rho D V}{\mu} \tag{1}$$

En la **Tabla 1** se presenta la clasificación creada, para la cual se utiliza el parámetro número de Reynolds.

Re ≤ 2000	Flujo Laminar
2000 < Re ≤ 4000	Flujo Transitorio
Re > 4000	Flujo Turbulento

Tabla 1. Clasificación del régimen de flujo.

#### - Flujo laminar:

El flujo laminar obedece la ley de viscosidad de Newton; debido a que predominan las fuerzas viscosas, las capas de fluido se mueven unas sobre otras en dirección al flujo, obteniendo líneas de corrientes suaves, cuyo resultado para el perfil de velocidad es una forma parabólica [3,4].

#### - 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 [5]. En un flujo de régimen turbulento se presentan tres zonas de distribución de velocidades y esfuerzos que describen su comportamiento: (i) zona laminar, (ii) zona de transición y (iii) zona turbulenta, ilustradas en la **Figura 2.** 



Es posible describir el comportamiento de cada una las regiones de un fluido en régimen turbulento mostradas en la **Figura 2**, a partir de distintos modelos basados en aproximaciones experimentales y valores empíricos debido a su nivel de complejidad.

#### 3. Densidad del Aire

Se usó la ecuación recomendada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM 2007) para determinar la densidad del aire de acuerdo a las condiciones del laboratorio durante la experimentación [6].

Para obtener el valor de la densidad es necesario determinar la fracción molar de vapor de agua (Xv) y el factor de compresibilidad (Z), expresiones dadas en función de la presión (P), temperatura (T) y humedad relativa (H) del sistema de trabajo [6]. Las relaciones matemáticas necesarias se presentan en las Ecuaciones 2, 3 y 4. El valor de las constantes utilizadas se encuentra en el Suplemento A.

$$\rho = \frac{(P * Ma)}{ZRT} \left[ 1 - x_{\nu} \left( 1 - \frac{M\nu}{Ma} \right) \right]$$
(2)

$$Xv = \left(\frac{h}{100}\right) * \left( \left(\alpha + \beta * P + \gamma * t^2\right) * \frac{e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})}}{P} \right)$$
(3)

$$Z = 1 - \frac{P}{T} * \left[ a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \left( (b_0 + b_1 t) x_v \right) + \left( (c_0 + c_1 t) x_v^2 \right) \right] + \left( \frac{P^2}{T^2} * (d + e x_v^2) \right)$$
(4)

#### 4. Viscosidad del Aire

Para la viscosidad del aire a bajas presiones se utilizó la ecuación de Chapman – Enskog (Ecuación 5), que depende del parámetro de Lennard Jones ( $\sigma$ ) y la función integral de colisión ( $\Omega$ ) [7].

$$\mu = 2,6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{M*T}}{\sigma^2 * \Omega_{\mu}} \tag{5}$$

Donde la viscosidad  $\mu$  (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  $\sigma$ , conocido como el diámetro de colisión característico de cada molécula (en Ångström Å).

La función integral de colisión ( $\Omega$ ) es un factor de corrección de la desviación respecto al comporta-

miento de la esfera rígida, que depende de la temperatura adimensional  $(T^*)$  [7].

#### METODOLOGÍA

Las mediciones fueron realizadas con el anemómetro de hilo caliente CTA previamente calibrado, de referencia SCHMIDT<sup>®</sup> Flow Sensor SS 20.400, ilustrado en la **Figura 3**.



Figura 3. SCHMIDT Flow Sensor SS 20.400.

#### Ciencia

![](_page_17_Picture_1.jpeg)

*Figura 4.* Montaje experimental del CTA en el túnel de viento: a) Costado derecho de la sección de pruebas, b) Costado izquierdo de la sección de pruebas, c) Montaje general.

#### 1. Desarrollo experimental

Para determinar los perfiles de velocidad el CTA se desplazó por 10 posiciones cubriendo la mayor parte del diámetro (29 cm) de la sección de pruebas del túnel (**ver Figura 4**). Se fijaron las velocidades nominales de 2, 8, 14 y 18 m/s en una posición desde las paredes de 14,3 y 14,7 cm.

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. El túnel cuenta con un banco de adquisición de datos y una estrategia de calibración que verifica la alineación del instrumento y su adecuado funcionamiento. Durante las pruebas se registraron periódicamente los valores de la presión, humedad relativa y temperatura del laboratorio, variables utilizadas en cálculos posteriores.

#### - Modelo I

El profesor de ingeniería hidráulica de la Universidad de los Andes (Colombia) Juan Saldarriaga, describe detalladamente en su libro *"Hidráulica de Tuberías"* modelos desarrollados por varios autores para representar cada una de las regiones mencionadas en la **Figura 4.** A continuación, se reseña brevemente dichas zonas. **Zona laminar:** En esta región la magnitud del esfuerzo  $\tau_0$  tiene una tendencia constante y es descrito por la ecuación de viscosidad de Newton:

$$\tau_0 = \mu \, \frac{dV}{dy} \tag{6}$$

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

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \frac{V_X}{y} = v \frac{V_X}{y} \tag{7}$$

donde  $V_x$  es un promedió de la velocidad, y es la distancia de la sección transversal al interior del conducto y v es la 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 *x* y *y*.

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \tag{8}$$

El espesor de la subcapa laminar viscosa  $\delta^{\circ}$ es posible calcularlo usando la siguiente expresión:

$$\delta' = \frac{11.6 v}{v_*} \tag{9}$$

#### 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:

$$\frac{V_X}{V_*} = \frac{1}{0.4} \ln \frac{V_* y}{v} + 5,47 \qquad (10)$$

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:

$$\frac{V_X}{V_*} = \frac{1}{0.4} ln \frac{y}{k_s} + 8,48 \qquad (11)$$

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

#### 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 [5].

#### - Modelo II

Se emplearon las ecuaciones 13 y 14 tomadas del libro Mecánica de Fluidos de Robert Mott, las cuales recomienda el autor para determinar el perfil de velocidad en régimen turbulento [1].

Éstas están en función del factor de fricción, para calcularlo se usó la ecuación de Colebrook (Ecuación 12) [8], que a su vez depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería, la tubería en la cual se trabajó es de PVC con una rugosidad relativa  $\varepsilon/D = 5.1724 \times 10^{-6}$ .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 * \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{R_e\sqrt{f}}\right)$$
(12)

$$U_{m\acute{a}x} = \upsilon \left( 1 + 1,43\sqrt{f} \right) \tag{13}$$

$$U = v \left[ 1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10}(\frac{y}{r_0}) \right]$$
(14)

#### RESULTADOS

#### 1. Resultados experimentales

El resultado de las velocidades máximas y promedio registradas por el CTA durante la experimentación, al igual que los números de Reynolds y el régimen característico de cada configuración son presentados en la **Tabla 2.** 

La viscosidad y densidad del aire obtenidas fueron de 0,0001825 poise y 1,0573 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

En la **Figura 5** 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, representados por A, B, C y D respectivamente. La escala de la ordenada hace referencia al diámetro de la sección de pruebas del túnel (0,29 m), distancia cubierta por 10 puntos de medición.

#### 2. Resultados del Modelo I

La zona laminar viscosa sólo conforma el 2 % o menos de todo el perfil de velocidad en un flujo turbulento [5], por tanto, fue posible omitirse durante el análisis. Fue tenida en cuenta la rugosidad de la sección de pruebas del túnel  $k_s$  [2], con un valor correspondiente de 1,44x10<sup>-6</sup> m.

Velocidad Nominal [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad Promedio [m/s]	Re	Régimen de Flujo
2	2,0968	1,8473	35224,5417	Turbulento
8	8,1304	7,0575	136586,3147	Turbulento
14	14,0061	12,2346	235294,1288	Turbulento
18	17,9583	15,7218	301688,6013	Turbulento

![](_page_19_Figure_10.jpeg)

Tabla 2. Resultados experimentales.

![](_page_19_Figure_12.jpeg)

![](_page_20_Figure_1.jpeg)

Como se puede apreciar en la **Figura 6**, el modelo I se ajusta a los datos experimentales con errores entre el 1 y 4% (ver Suplemento B).

Figura 6. Perfiles de velocidad teóricos (según modelo I) y experimentales de las configuraciones A, B, C y D.

#### 3. Resultados del Modelo II

En la Figura 7 se observa que el modelo teórico II se ajusta a los se ajusta a los datos experimentales con errores que oscilan entre el 1 y 8 %, excepto para los puntos cercanos a la pared de la tubería, en los cuales se obtiene un error entre 26,1 y 57,8 %. También se evidencia que para las configuraciones C y D donde el número de Reynolds es mayor, el error disminuye.

#### DISCUSIÓN

Al comparar los modelos teóricos con los datos experimentales, se observa que el modelo teórico I presenta el mejor ajuste entre los dos modelos, con errores que no superan el 4 %. Por otra parte, si bien los errores del modelo teórico II no exceden el 8% en la zona de turbulencia, para los puntos cercanos a la pared de la tubería, el error supera el 50 %. Esto se puede dar debido a que el Reynolds, aunque se utiliza también para gases, fue planteado principalmente para fluidos líquidos, es decir más viscosos, lo cual genera mayor resistencia en la zona cercana a la pared (zona laminar), en este caso el fluido que se utilizó fue aire, lo cual explica el comportamiento en esta zona. Para las configuraciones C y D del modelo teórico II el número de Reynolds es mayor y el error disminuye, por lo cual se deduce que este modelo presenta un mejor ajuste a números de Reynolds altos; como se evidencia en el anexo B.

![](_page_21_Figure_3.jpeg)

Figura 7. Perfiles de velocidad teóricos (según modelo II) y experimentales de las configuraciones A, B, C y D.

#### CONCLUSIONES

Al comparar los modelos teóricos utilizados para la caracterización de perfiles de velocidad en régimen turbulento, se observó que el modelo teórico I se ajusta mejor a los datos experimentales, obteniéndose errores entre el 1 y 4 %, mientras que con el modelo teórico II se alcanza un error del 8 %, excepto para los puntos cercanos a la pared de la tubería, en los cuales el error oscila entre 26,1 y 57,8 %, desviándose significativamente de los datos experimentales.

Los modelos utilizados fueron determinados en ductos cerrados y sección circular a partir de fluidos líquidos, sin embargo, para esta experimentación dichos modelos se ajustan adecuadamente al comportamiento de flujos de aire en ductos circulares de baja rugosidad.

El modelo teórico I es idóneo para describir el flujo turbulento de aire en tuberías, bajo condiciones cercanas de presión, temperatura y humedad a las presentes en el laboratorio durante la experimentación.

#### APORTES

El desarrollo del presente artículo se logró gracias a la contribución igualitaria del trabajo realizado por los autores Edison Granados y Carolina Madolet.

#### REFERENCIAS

[1] Gonzales S, Chiroque J, Urcuhuaranga W. Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Perú, 2011. Disponible en: http://guzlop-editoras.com/web\_des/ener01/eolica/pld0442. pdf. Accedido septiembre 25, 2016.

[2] Angarita J. 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. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga; 2010.

[3] Mott R. Mecánica de fluidos (6 ed), Pearson Educación, México; 2006. [4] Bird B, Stewart W, Lightfoot E. Fenómenos de transporte (2da ed), Limusa Wiley, 2006.

[5] Saldarriaga J. Hidráulica de Tuberías (1ra ed), McGraw Hill, 2001.

[6] Picard A, Davis R S, Glaser M, Fujii K. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrologia 2008; 45 (2): 149-155.

[7] Betancourt R. Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento (1ra ed), Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales; 2003, 201.

[8] Çengel Y, Cimbala J. Mecánica de fluidos (1ra ed), McGraw-Hill, 2006

#### SUPLEMENTO A

Constante	Cantidad	Unidades		
А	1,23788E-05	K <sup>-2</sup>		
В	-0,01912132	K <sup>-1</sup>		
С	33,93711047			
D	-6343,1645	К		
γ	0,0000056	K <sup>-2</sup>		
α	1,00062			
β	3,14E-08	Pa⁻¹		
<b>a</b> <sub>0</sub>	1,58123E-06	KPa⁻¹		
<b>a</b> 1	-2,9331E-08	Pa⁻¹		
<b>a</b> <sub>2</sub>	1,1043E-10	K⁻¹ Pa⁻¹		
b <sub>0</sub>	0,000005707	KPa <sup>₋1</sup>		
b <sub>1</sub>	-2,051E-08	Pa⁻¹		
<b>C</b> <sub>0</sub>	0,00019898	KPa⁻¹		
C <sub>1</sub>	-2,376E-06			
d	1,83E-11	K <sup>-2</sup> Pa <sup>-2</sup>		
е	-7,65E-09	K <sup>-2</sup> Pa <sup>-2</sup>		
Ma	0,02896546	Kg mol <sup>-1</sup>		
M <sub>v</sub>	0,01801528	Kg mol⁻¹		
R	8,314472	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>		
Cpl	1			
ε <sub>0</sub> /k	78,6	K		
σ	3,711	Å		
M <sub>aire</sub>	28,97	g mol <sup>-1</sup>		
3	0,0015	mm		
ε/D	5,17241E-06			

#### SUPLEMENTO B

En las tablas mostradas a continuación, se presentan los datos experimentales, los datos obtenidos al aplicar los modelos teórico I y II y el error experimental absoluto, el cual hace referencia a la desviación de los modelos teóricos comparado con los resultados experimentales.

Posición	Teórico I			Experimental				Error experimental absoluto (%)				
	A (2	B (8	C (14	D (18	A (2	B (8	C (14	D (18	A (2	B (8	C (14	D (18
[]	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	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

Posición	Teórico II			Experimental				Error experimental absoluto (%)				
	A (2	B (8	C (14	D (18	A (2	B (8	C (14	D (18	A (2	B (8	C (14	D (18
Louil	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	m/s)	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

### BANCO GRAVIMÉTRICO PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE LÍQUIDOS

#### Diego Antonio Manrique Moreno<sup>\*1</sup>, Ferney David Antolinez Tobo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio. Piedecuesta, Santander, Colombia.

**Resumen:** La medición de flujo (líquido o gas) es una actividad esencial en todas las etapas de procesamiento de fluidos. Se requiere realizar una medición que cumpla con las reglamentaciones establecidas en los esquemas de operación y control de las plantas, las normas de referencia, los contratos de compra y venta, etc., para un adecuado funcionamiento del proceso al cual se encuentra asociado. Una situación particular en la cual tiene un alto impacto económico la medición de flujo es en la comercialización de hidrocarburos, debido a su alto valor.

La calibración de un instrumento de medición es la comparación directa entre las indicaciones del equipo bajo prueba respecto a la indicación de un medidor patrón con trazabilidad nacional o internacional. Lo anterior permite cuantificar las desviaciones de los equipos de medición respecto a los patrones y así poder establecer las correcciones necesarias.

Este documento describe el desarrollo del banco gravimétrico de líquidos del CDT de Gas, el cual opera en un intervalo de caudal másico desde 1 kg/min hasta 900 kg/min y es empleado en la calibración de medidores másicos tipo Coriolis en condiciones de laboratorio. Se describen aspectos como el método de calibración, los componentes del banco, y las pruebas de validación y confirmación del método junto con sus resultados y análisis.

Palabras clave: Gravimétrico, Coriolis, totalización de masa, medidores de líquidos.

Abstract: Measurement of gas or liquid flows is an essential activity in all of the fluid processing stages. An adequate process functioning requires that the measurements comply with the established regulations in plant operation and control schemes, reference standards, purchase and sale contracts, etc. A particular situation in which the flow measurement has a high economic impact is hydrocarbon commercialization, due to its high value.

The calibration of a measuring instrument is the direct comparison between the indications of the meter under test and a master meter with national or international traceability. This allows to quantify the bias of measurement equipments with respect to standards, and thus be able to establish the required corrections.

This paper describes the development of the liquid flow gravimetric calibration bench of the CDT de Gas, which operates in a mass flow rate interval between 1 kg/min and 900 kg/min, and is employed to calibrate Coriolis mass flow meters in laboratory conditions. Different aspects as calibration method, bench components, validation and confirmation tests, along with their results and analysis, are described in this work.

Keywords: Gravimetric, Coriolis, mass totalization, liquid meters.

<sup>\*</sup> dmanrique@cdtdegas.com

![](_page_25_Picture_0.jpeg)

#### INTRODUCCIÓN

Las mediciones correctas y confiables (objetivo de la metrología) tienen una clara importancia para el cumplimiento de las exigencias de los clientes, reglamentaciones, etc., pues permite alcanzar un nivel de calidad y confianza de los productos y servicios [1], permitiendo asegurar la transparencia en el intercambio de productos entre vendedores y compradores.

El sector de los hidrocarburos no es la excepción, y día a día demanda el uso de sistemas de medición con características metrológicas especiales para cumplir con los cada vez más exigentes requisitos establecidos en las normas de referencia y/o en los contratos de compraventa correspondientes [2]. Una parte de los aspectos necesarios para garantizar las correctas mediciones son los procesos de calibración de los instrumentos de medida en los diferentes parámetros implicados [3].

Obtener un sistema de medición que entregue resultados confiables, implica un proceso que inicia con la adecuada selección e instalación de sus componentes, y se mantiene en el tiempo a través de la ejecución de actividades que contemplan la apropiada operación y mantenimiento del mismo, la comprensión del proceso de medición y la correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Con el fin de dar cumplimiento a los requerimientos especiales de la industria, especialmente en la medición de hidrocarburos gaseosos y líquidos, y la calibración de sus equipos de medida, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) decidió desarrollar una infraestructura metrológica con la capacidad de calibrar medidores másicos tipo Coriolis. Este tipo de medidores son empleados por la industria del petróleo en aplicaciones de transferencia de custodia, crudo y productos terminados [2, 4], como el caso de las estaciones de servicio de combustible y en transacciones de Gas Licuado de Petróleo (GLP). De igual forma, también se usa en la industria del gas natural, en la medición en transferencia de custodia y en los surtidores de Gas Natural Vehicular (GNV) [5, 6]. Estos medidores también son usados en la industria de alimentos y bebidas, industria farmacéutica, y adicionalmente como patrones de referencia para la calibración de medidores de flujo [2].

#### METODOLOGÍA

El sistema de calibración de medidores de flujo de líquidos del CDT de Gas (ver **Figura 1**) fue diseñado, construido y caracterizado por personal de la Corporación, basado en los requerimientos de las normas ISO 4185:1980, ISO 9368-1:1990 e ISO 10790:2015. El banco de calibración opera bajo el principio gravimétrico tipo pesaje estático con método de arranque-parada dinámico [7 - 9].

![](_page_26_Picture_9.jpeg)

Figura 1. Banco gravimétrico de líquidos.

Este método normalizado consiste en comparar la cantidad de masa de líquido recolectada en un tanque (y medida en una báscula patrón) durante un tiempo determinado, con la masa medida por el equipo bajo calibración durante el mismo periodo de tiempo. La masa neta del tanque se determina calculando la diferencia entre la masa al inicio de la prueba y la masa después de realizar la colecta. Debido a que la entrega de líquido al tanque de recolección no es constante, se hace necesario de una válvula desviadora de flujo para dirigir intermitentemente el líquido al tanque sin interrumpir el caudal.

El banco gravimétrico de líquidos está compuesto por tres subsistemas. El primero consta de los componentes mecánicos (tubería, válvulas, bombas, etc.), el segundo es el sistema de control que automatiza el proceso y permite la adquisición y registro histórico de variables, y por último una herramienta informática donde se realizan los cálculos y se generan los resultados.

A continuación se presenta cada uno de los componentes principales del banco de calibración de la Corporación CDT de Gas:

#### 1. Cisterna y líneas de flujo

El banco gravimétrico dispone de una cisterna de 2000 litros de capacidad para almacenamiento del agua que se utiliza en las calibraciones. Construida en concreto, se encuentra de manera subterránea en el área del banco. De esta cisterna se toma el agua que recircula por el circuito hidráulico.

Las líneas de flujo están conformadas en su mayoría en acero inoxidable, y una pequeña parte en PVC y en manguera de silicona (en zonas donde se requiere flexibilidad de la línea). Estos materiales resistentes a la corrosión permiten mantener la integridad del banco con el paso del tiempo. El banco posee tubería, accesorios y acoples de diámetro nominal 3", 2", 1", ¾" y ½", para el acople de medidores bajo prueba de esos diámetros.

#### 2. Sistema de generación de flujo

La generación de flujo del banco se realiza mediante bombas centrífugas que cuentan con la capacidad requerida para obtener desde 1 kg/ min hasta 900 kg/min. El ajuste y la estabilidad del flujo de calibración se logran mediante variadores de frecuencia acoplados a los motores de las bombas, donde el ajuste se realiza por medio de un control PID (proporcional, integral y derivativo) o por modificación directa de la frecuencia. **La Figura 2** muestra el lazo cerrado del sistema de control para la generación de caudal. Los variadores también permiten ahorrar energía y reducen calentamiento del fluido. Adicionalmente, el banco posee un tren de regulación de válvulas para realizar un

![](_page_27_Figure_10.jpeg)

Figura 2. Lazo de control regulación de caudal.

ajuste fino por estrangulación en caso de que se desee o sea necesario.

#### 3. Sistema de pesaje

El sistema de pesaje del banco consta de tres balanzas electrónicas equipadas con tanques fabricados en fibra de vidrio de igual capacidad en volumen. Las balanzas son los instrumentos de referencia del banco y cuentan con las siguientes capacidades: 60 kg con división de escala 1 g, 150 kg con división de escala 1 g, y 1500 kg multiescala (0 kg a 300 kg división de escala 10 g; 300 kg a 600 kg división de escala 20 g; 600 kg a 1500 kg división de escala 50 g). Las básculas poseen comunicación Modbus con el sistema de control del banco donde se almacena el historial de su indicación.

#### 4. Válvula desviadora

La válvula desviadora fue diseñada por personal del CDT de Gas, basándose en las recomendaciones dadas por ISO 4185:1980 e ISO 9368-1:1990. Estos son elementos pivotantes usados para dirigir el flujo alternadamente entre el bypass y el tanque de medición (ver **Figura 3**). En este caso, la válvula se desarrolló como una canaleta en forma de pantalón o "V" invertida. El movimiento de la válvula es realizado por un pistón neumático activado por una válvula biestable electroneumática, controlada por el sistema de automatización del banco. El conteo de masa del medidor bajo prueba inicia y finaliza cuando la válvula se encuentra en el centro

![](_page_28_Picture_4.jpeg)

Figura 3. Válvula desviadora.

29

de la trayectoria de flujo, mediante un sensor fotoeléctrico alineado con el centro de la válvula [7, 10].

#### 5. Sistema de control y adquisición de datos

Con el objetivo de realizar el proceso de manera más eficiente (aumentar repetibilidad en las mediciones) y disminuir los errores humanos en la calibración y tiempo de ejecución [11], varios parámetros como activación de temporizadores, activación de actuadores, adquisición de pulsos y medición de variables secundarias como presión, temperatura y caudal se encuentran automatizadas con la plataforma de adquisición y control OPTO 22. En esta plataforma también se desarrolló la interfaz hombre-máquina (HMI) para la interacción con el banco desde un computador. La **Figura 4** muestra una de las ventanas de la interfaz.

#### 6. Herramienta para análisis de datos

La herramienta para análisis de datos asociada al banco gravimétrico permite la gestión de los datos de cada una de las variables implicadas en el modelo matemático y requisitos de la norma de referencia, al igual que los parámetros asociados, reduciendo las posibles causas que puedan afectar la calidad de los resultados finales. Entre las facilidades que ésta herramienta ofrece están la generación del informe de resultados disminuyendo el tiempo de realización de éste y la generación de las evidencias correspondientes.

El objetivo de la calibración es conocer el error relativo del medidor, y su incertidumbre, en diferentes caudales o puntos de calibración distribuidos dentro de su alcance de medición [12]. El error relativo para totalización de masa se determina con la Ecuación 1.

$$Error = \left(\frac{M_{MUT}}{M_{Mi} * C_{desv} * \left(\frac{1 - \frac{\rho a}{\rho p}}{1 - \frac{\rho a}{\rho w}}\right)} - 1\right) * 100$$
(1)

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

Figura 4. HMI del Banco Gravimétrico de Líquidos.

Donde:

*Error:* porcentaje de error en la indicación del medidor [%].

 $M_{MUT}$ : masa registrada por el medidor bajo calibración [kg].

M<sub>Mi</sub>: masa registrada en la báscula [kg].

 $C_{desv}$ : constante de la válvula desviadora [adimensional].

 $\rho a$ : densidad del aire.  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ .

 $\rho p$ : densidad de las pesas utilizadas en la calibración de la balanza.  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ .

 $\rho w$ : densidad del agua.  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ .

Como requisito de las normas técnicas usadas como referencia para el procedimiento, y el propósito de asegurar cada una de las variables del modelo matemático del proceso, fue necesario realizar las siguientes pruebas:

-Determinación de la constante de la válvula desviadora [7].

-Determinación de la densidad del fluido de calibración [8]. -Requisitos de la estabilidad de caudal y variación de la temperatura del agua [13, 14].

#### - Constantes de las válvulas desviadoras

Al utilizarse un método gravimétrico estático, con arranque parada dinámico, se hace indispensable el uso y caracterización de las válvulas desviadoras. Estos elementos fueron caracterizados siguiendo los lineamientos de la ISO 4185:1980 Anexo A, método 1 [7]. De este ejercicio se determinó una constante para cada válvula (que ingresa en el modelo matemático como una corrección a la masa de líquido colectada en el tanque) y la incertidumbre de cada una (estimada a través de Método de Monte Carlo).

#### - Densidad del líquido

En la calibración de medidores de masa de líquidos, la densidad del fluido es un factor que ingresa en el modelo matemático para la corrección por flotabilidad, en la indicación del patrón. En la calibración de medidores volumétricos, este factor ingresa adicionalmente para la conversión de valores de masa del patrón, a unidades de volumen [15-17].

#### - Estabilidad de caudal y temperatura del agua

En cumplimiento de los requisitos para calibración estipulados en la ISO 10790, se realizó una evaluación de la estabilidad de caudal y temperatura en el intervalo de operación del banco gravimétrico. La norma estipula que el caudal debe permanecer estable en +/-5 % del caudal seleccionado, y la temperatura del agua debe permanecer dentro de 1 °C entre puntos de calibración y su variación no debe exceder los 5 °C en toda la calibración [8].

#### RESULTADOS

La norma ISO/IEC 17025 establece en el numeral 5.9 que "el laboratorio debe tener procedimientos de control de calidad para realizar el seguimiento de la validez de los resultados de los ensayos y las calibraciones llevados a cabo". Para realizar la validación del método de calibración utilizado en el banco gravimétrico, se realizaron los siguientes procedimientos y pruebas:

#### 1. Prueba de precisión del proceso de calibración

Se realizaron pruebas de repetibilidad y reproducibilidad bajo condiciones de cambio de metrólogo y día, a resultados generados a partir de calibraciones ejecutadas en el banco. La evaluación estadística se realizó siguiendo los lineamientos dados en la norma ASTM E691 mediante un análisis numérico, el cual consistió en el cálculo de las componentes individuales de repetibilidad y reproducibilidad, y posterior una evaluación gráfica por medio de las constantes estadísticas h y k de Mandel, donde el valor de h representa la consistencia estadística entre calibraciones y k representa la consistencia estadística interna de las calibraciones [18]. Se realizó una prueba de precisión para cada sistema de pesaje (3 en total). Las calibraciones fueron realizadas por diferentes metrólogos, en días distintos.

La **Figura 5** representa los resultados de tres calibraciones realizadas a un medidor másico Coriolis marca Micro Motion modelo CNG050 en el intervalo de caudal de 1 kg/min hasta 25 kg/min. La **Figura 6** muestra los resultados del análisis gráfico a través de las constantes de h y k de Mandel. Este análisis permite identificar valores atípicos o inconsistencias del proceso. Para la matriz de experimentos diseñada en este intervalo se utilizaron valores críticos de h = 1,15 y k = 1,40 para un nivel de confianza del 5 %.

![](_page_30_Figure_9.jpeg)

Figura 5. Resultados calibración medidor Micro Motion CNG050.

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

Figura 6. Consistencias estadísticas h y k de Mandel para el medidor modelo CNG050.

![](_page_31_Figure_3.jpeg)

Figura 7. Resultados de calibración medidor Endress+Hauser 83F25.

La **Figura** 7 representa los resultados de tres calibraciones de un medidor másico tipo Coriolis marca Endress+Hauser modelo 83F25 en el intervalo de caudal desde 40 kg/min hasta 130 kg/min. Por otra parte, **la Figura 8** presenta el análisis de los estadísticos h y k de Mandel; para la matriz de experimentos diseñada en este intervalo se utilizó valores críticos de h = 1,15 y k = 1,40 para un nivel de confianza del 5 %.

La Figura 9 presenta los resultados de tres calibraciones de un medidor másico marca Endress+Hauser modelo 83F80 en el intervalo de caudal de 150 kg/min hasta 900 kg/min. La Figura 10 muestra los respectivos análisis con los estadísticos h y k de Mandel para dicha prueba.

#### 2. Prueba de exactitud de los resultados de calibración

Con el fin de evaluar el desempeño del laboratorio en esta magnitud y confirmar la exactitud del método, se realizó un análisis del error normalizado de dos medidores Coriolis como dispositivos de transferencia a través de la comparación de los resultados de los certificados de calibración acreditados emitidos por dos laboratorios de calibración (CDT de Gas y Endress&Hauser).

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

Figura 8. Consistencias estadísticas h y k de Mandel para el medidor modelo 83F25.

![](_page_32_Figure_3.jpeg)

Figura 9. Resultados de calibración medidor Endress+Hauser 83F80.

![](_page_32_Figure_5.jpeg)

Figura 10. Consistencia estadística h y k de Mandel para el medidor modelo 83F80.

#### Tecnología

Se usaron como valores de referencia los datos emitidos por el fabricante en sus certificados de calibración. El análisis de resultados fue realizado según lo descrito en la norma ISO 17043 a través de la Ecuación 2.

$$E_n = \frac{X_{CDT} - X_{E\&H}}{\sqrt{(U_{CDT}^2 + U_{E\&H}^2)}}$$
(2)

Donde:

 $E_n$ : error normalizado.

 $X_{CDT}$ : valor del mensurando reportado por el laboratorio usando el método bajo validación o verificación.

 $X_{(E\&H)}$ : valor del mensurando reportado por el otro laboratorio o método.

 $U_{CDT}$ :: incertidumbre expandida del mensurando dada por el laboratorio usando el método bajo validación o verificación.

 $U_{(E\&H)}$ : incertidumbre expandida del mensurando reportada por el otro laboratorio o método.

El error normalizado es evaluado así:

 $En \leq 1$  La comparación fue exitosa En > 1 La comparación no fue exitosa

RESULTA	DOS ANÁLISIS	ERROR N	IORMALI	ZADO		
Laboratoria	Error Xi	U	k	di	U(di)	122
Laboratorio	%	%		%	%	En
Caudal de 12 kg/min						
Endress&Hauser	0,01	0,03	2,00	0.00	0.100	0.105
CDT	0,03	0,18	1,97	0,02	0,182	0,105
Caudal de 21 kg/min						
Endress&Hauser	-0,01	0,03	2,00	0.00	0,132	0,144
CDT	0,01	0,13	1,97	0,02		
Caudal de 30 kg/min	28 A1		2		84	
Endress&Hauser	-0,02	0,03	2,00	0.01	0.400	0.405
CDT	0,00	0,13	1,97	0,01	0,132	0,106
Caudal de 45 kg/min			Ĩ	Î		82 25
Endress&Hauser	-0,01	0,03	2,00	0.04	0.100	
CDT	0,00	0,13	1,97	0,01	0,132	0,098
Caudal de 60 kg/min						
Endress&Hauser	0,00	0,03	2,00	0.01		0,076
CDT	0,01	0,13	1,97	0,01	0,132	

**Tabla 1.** Resultados análisis de error normalizado intervalode caudal de 12 kg/min a 60 kg/min.

Las **Tablas 1 y 2** presentan los resultados del análisis del error normalizado.

Como se puede observar en las **Tablas 1 y 2**, el resultado del error normalizado en todos los casos fue menor a 1, y por tanto se considera que el desempeño del método durante la validación o verificación fue satisfactorio para el método de calibración validado.

#### DISCUSIÓN

Una manera de evaluar un proceso de calibración consiste en realizar pruebas de precisión y exactitud, y analizarlas con herramientas estadísticas apropiadas tales como las descritas anteriormente. Si los resultados se encuentran dentro de los límites establecidos, estos datos son evidencia de que los resultados son consistentes y permiten dar robustez al proceso de calibración.

El siguiente paso de la Corporación CDT de Gas en la medición de líquidos es ampliar el alcance de su infraestructura metrológica para la calibración de tecnologías tales como turbinas, vortex, etc., así como llevar las calibraciones al sitio de operación de los medidores, reduciendo costos y tiempo asociados al proceso.

RESULTADOS ANÁLISIS ERROR NORMALIZADO										
Laboratorio	Error Xi	U	К	di	di U(di)					
	%	%		%	%					
Caudal de 120 kg/min										
Endress&Hauser	0,01	0,03	2,00	0.00	0 132	0.008				
CDT	0,01	0,13	1,99	0,00	0,132	0,000				
Caudal de 210 kg/min										
Endress&Hauser	0,023	0,03	2,00	0.11	0,123	0.887				
CDT	-0,09	0,12	1,96	0,11		0,007				
Caudal de 300 kg/min										
Endress&Hauser	0,00	0,03	2,00	0.08	0 1 2 2	0.646				
CDT	-0,08	0,12	1,96	0,00	0,123	0,040				
Caudal de 450 kg/min										
Endress&Hauser	0,02	0,03	2,00	0 10	0 1 2 3	0.831				
CDT	-0,08	0,12	1,96	0,10	0,123	0,031				
Caudal de 600 kg/min	Caudal de 600 kg/min									
Endress&Hauser	0,03	0,03	2,00	0.12	0 1 2 3	0.982				
CDT	-0,10	0,12	1,97	0,12	0,125	0,582				

**Tabla 2.** Resultados análisis de error normalizado intervalode caudal de 120 kg/min a 600 kg/min.

#### CONCLUSIONES

Con el desarrollo del banco gravimétrico de líquidos, el CDT de Gas ofrece actualmente a la industria colombiana el servicio de calibración de medidores másicos Coriolis en el intervalo entre 1 kg/min y 900 kg/min y con diámetro nominal desde ½" hasta 3", cumpliendo los parámetros establecidos en la norma de referencia ISO 10790:2015. El proceso de calibración se encuentra acreditado por el ONAC bajo los lineamientos y requisitos de la ISO/IEC 17025:2005.

Las pruebas de precisión y exactitud a las que fue sometido el proceso de calibración implementado en el banco gravimétrico resultaron satisfactorias. El alcance del banco gravimétrico del CDT de GAS incluye la calibración (no acreditada) de medidores tipo vortex y desplazamiento positivo en el intervalo de flujo de 1 l/min hasta 900 l/min.

#### REFERENCIAS

[1] Lazos R. La Metrología como soporte a los sistemas de gestión en la industria, 6ª Jornada Internacional de Medición de Fluidos, 2011.

[2] Loza D. Validación del uso de los medidores de flujo másico tipo Coriolis como patrones de referencia en aplicaciones de transferencia de custodia. 6ª Jornada Internacional de Medición de Fluidos, 2011.

[3] International Organization of Standardization (ISO). "ISO 10012 Measurement Management Systems — Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment", International Standard, 2003.

[4] American Petroleum Institute. Manual of Petroleum Measurement Standards - Measurement of liquid hydrocarbons by Coriolis meters. Chapter 5 – Section 6. 2002.

[5] Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. Cadena del Gas Licuado del Petróleo 2013. Bogotá, D.C, 2013.

[6] Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Estándares de los Sistemas de Medición en las Actividades de la Cadena de Prestación del Servicio Público Domiciliario de Gas Licuado del Petróleo –GLP– Informe Final. UTP, 2012. [7] International Organization of Standardization (ISO). ISO 4185 Measurement of liquid in closed conduits – Weighing method, International Standard, 1980.

[8] International Organization of Standardization ISO, "ISO 10790 Measurement of liquid flow in closed conduits – Guidance for selection, installation and use of Coriolis meters (Mass flow, density and volume flow measurements)", International Standard, 2015.

[9] Mantilla W, Covelli G. Comparación entre los diferentes métodos de calibración de medidores másicos basado en análisis de incertidumbre. Corporación CDT de Gas, 2012.

[10] International Organization of Standardization (ISO). ISO 9368-1 Measurement of liquid flow in closed conduits by the weighing method - Procedures for checking installations - Part 1: Static weighing systems, 1990.

[11] Rodríguez A. Sistemas SCADA, 2<sup>*a*</sup> edición. Marcombo ediciones técnicas, 2007.

[12] Engel R, Baade H-J. New design dual balance gravimetric reference system with PTB's new hydrodynamic test field. International Conference on Flow Measurement FLOMEKO, 2003.

[13] La Guía MetAS. Densidad del agua. Junio, 2010. Disponible Online en: http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-10-06-densidad-agua.pdf.

[14] Centeno LM, Burgos LdC, Becerra LO. Determinación de la densidad del agua tipo I ASTM utilizada en el CENAM con patrones sólidos de densidad. Centro Nacional de Metrología CENAM. Simposio de Metrología. México, 2004.

[15] Engel R, Baade H-J. Water density determination in high-accuracy flowmeter Calibration- Measurement uncertainties and practical aspects. PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Department of liquid flow, Braunschweig and Droge Baade Drescher Consulting Engineers, Salzgitter, Germany, 2011.

[16] Hafelfinger H. Economical Processes Deriving from Highly Accurate and Robust metrology, Oil&-Gas, Endress+Hauser Flowtec, 2009.

[17] Smits E. Calibration of Prover Tank Using a Coriolis Mass Flow Meter as the Master Meter. VSL, 2nd European Flow Measurement Workshop, 2014.

[18] La Guía MetAS. Aplicación metrológica de los estudios r&R (Repetibilidad y Reproducibilidad). Noviembre, 2003. Disponible Online en: http://www. metas.com.mx/guiametas/la-guia-metas-03-11-r-r.pdf

www.cdtdegas.com