Banco de Calibración de Caudal de Gas Empleando Elementos de Flujo Laminar (LFEs)

Gas Flow Calibration Bench Using Laminar Flow Elements (LFEs)

Andrés Felipe Rodríguez Carreño[1*]

[1] Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 Vía Refugio, Piedecuesta – Colombia

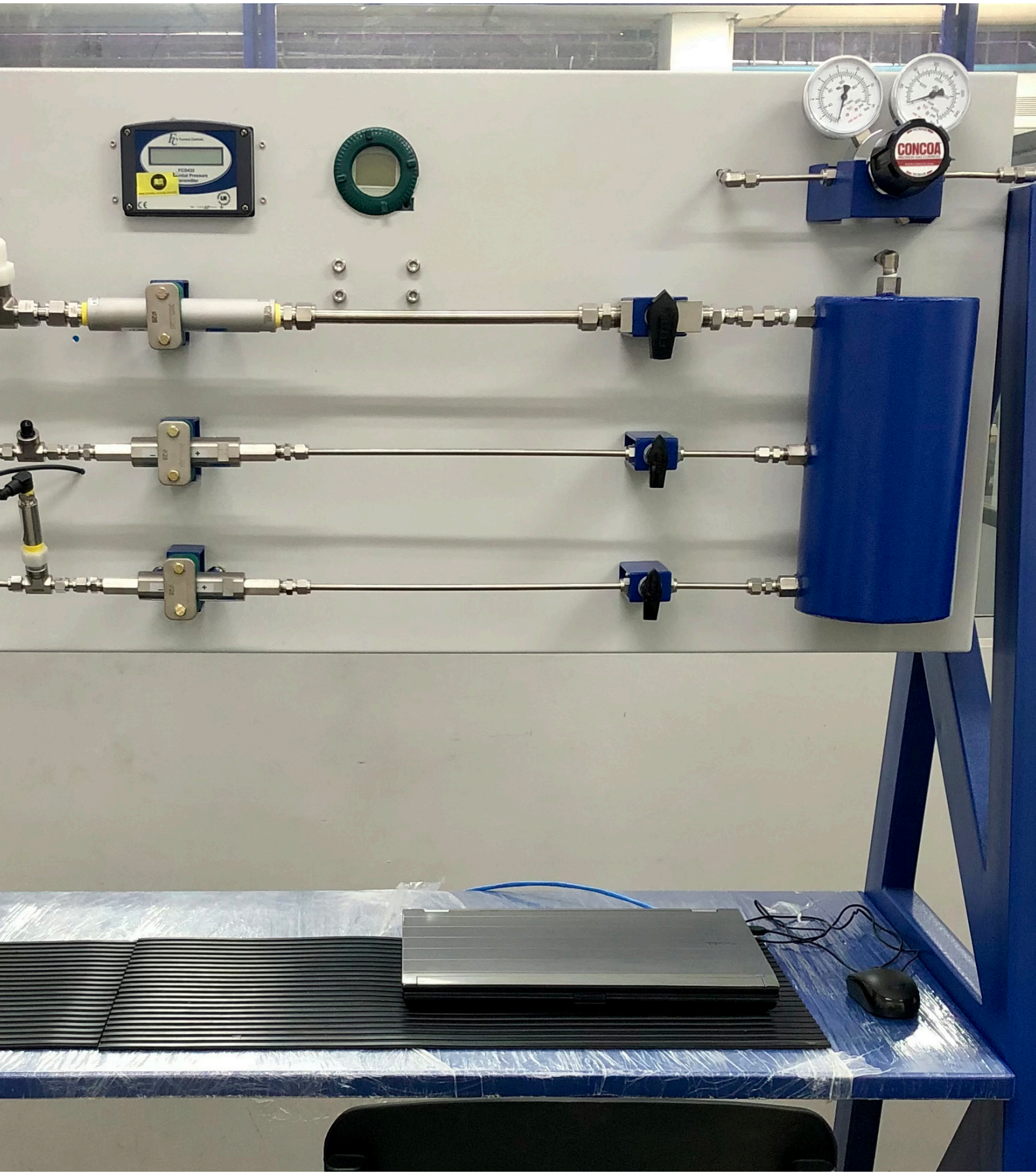
*frodriguez@cdtdegas.com

RESUMEN: Los Elementos de Flujo Laminar (LFEs) son reconocidos en diferentes industrias por su excelente operación como patrones de transferencia o patrones secundarios de calibración, debido a su geometría interna, principio de operación y cualidades metrológicas, especialmente en bajos y micro caudales. Los LFEs presentan dos diferencias principales con respecto a los medidores que operan bajo el mismo principio. Por un lado, son caracterizados de manera individual a través de su calibración, y por otro, mantienen una relación lineal entre el caudal volumétrico y la presión diferencial, lo que ha permitido su aplicación en diferentes disciplinas. El principio físico de los LFEs puede abordarse a partir de la sumatoria de caídas de presión o por medio de un análisis dimensional, permitiendo establecer la relación entre el caudal volumétrico, presión diferencial, densidad y viscosidad dinámica del fluido. La adecuada selección de instrumentación secundaria, especialmente la asociada a la presión diferencial, podría llegar a determinar tanto la rangeabilidad del LFE como la exactitud de la medición. Con base en las características mencionadas, los modelos matemáticos establecidos, las ventajas asociadas a la medición de flujo en régimen laminar y los requerimientos para un óptimo desempeño, se desarrolló un banco de calibración empleando LFEs junto con la acreditación de sus servicios bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025, reconocida por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

Palabras clave: *Elementos de flujo laminar (LFEs), calibración, incertidumbre, caudal volumétrico, presión diferencial.*

ABSTRACT: Laminar Flow Elements (LFEs) are recognized in different industries by their excellent operation as transfer standard or calibration secondary standard, due to their internal geometry, operation system, and metrological qualities, chiefly in low and micro flow rates. LFEs have two main differences with respect to meters that operate under the same principle. On the one hand they are individually characterized through their calibration, and on the other, they keep a linear relation between the volumetric flow rate and differential pressure, which has allowed its application in different disciplines. The physical principle of LFEs can be addressed from the sum of pressure drops or through a dimensional analysis, allowing to stablish the relationship between volumetric flow rate, differential pressure, density and dynamic viscosity of the fluid. The suitable selection of the secondary instrumentation, mainly that associated with differential pressure, could determine both LFE turndown range and measurement accuracy. Based on the characteristics mentioned, the settled mathematical models, the advantages associated with laminar flow regime measurement and the requirements for optimum performance, a calibration bench was developed using LFEs together with the accreditation of their services under the NTC-ISO/IEC 17025 standard, recognized by the National Accreditation Body of Colombia (ONAC).

Keywords: *Laminar flow elements (LFEs), calibration, uncertainty, volumetric flow rate, differential pressure.*


CONCOA

1 INTRODUCCIÓN

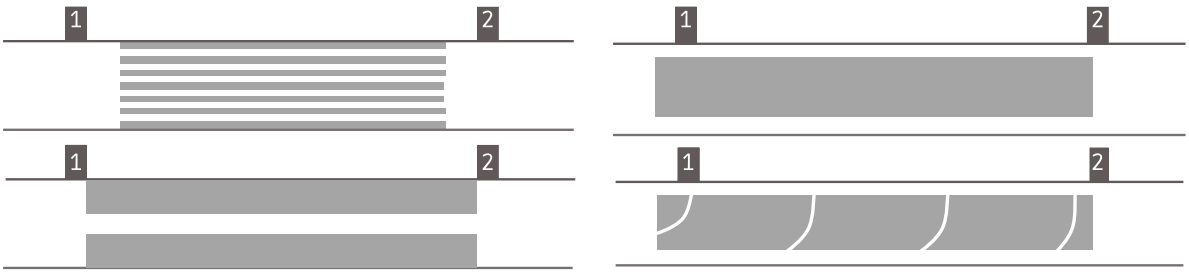
La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS), ha sido reconocida en la industria del gas por impulsar la productividad y competitividad del sector, mediante el desarrollo de tecnología y aplicación de conceptos inherentes a la metrología de fluidos, que contribuyan al mejoramiento de la calidad de los procesos, productos y servicios.

La sostenibilidad de la industria del gas depende en gran medida de la calidad y confiabilidad de la medición de flujo, debido al impacto directo en el control y seguridad de los procesos, pero especialmente en el vínculo transaccional entre proveedores y compradores. Por lo tanto, como laboratorio líder en metrología de volumen y caudal de gas en Colombia, el CDT de GAS continuamente se apropia de los avances de la ciencia y la tecnología, buscando que cada banco de calibración desarrollado brinde a la industria una solución eficaz y eficiente para atender las diferentes necesidades metrológicas.

Es importante considerar la diversificación de tecnologías emergentes de medición de flujo disponibles en el país, para lo cual se hace indispensable desarrollar patrones que aseguren la transparencia, confiabilidad y exactitud de medición en la proporción indicada. Cabe resaltar que el grado de exactitud requerido se asocia a la aplicación, tecnología y recursos disponibles, por lo cual un patrón o banco de calibración con la más alta capacidad de medición no siempre garantiza la óptima eficiencia del proceso.

Expuesto lo anterior, el creciente mercado de controladores y caudalímetros de gas, junto con los requerimientos metrológicos propios de estas tecnologías, llevó al desarrollo y puesta en marcha de un banco de calibración que empleara como patrones elementos de flujo laminar (LFEs), cubriendo los intervalos de operación más relevantes por medio de servicios acreditados bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025, reconocida por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC). A continuación, se describirá el principio físico y de operación de la tecnología seleccionada como patrón, las magnitudes involucradas e influencia de cada una en el modelo matemático e incertidumbre de calibración. Así mismo, se especificarán los componentes principales del banco, el alcance de operación y las características metrológicas, teniendo en cuenta las ventajas y limitantes de la tecnología emergente a nivel nacional empleada.

Figura 1. >> *Diseños comunes de LFEs.*



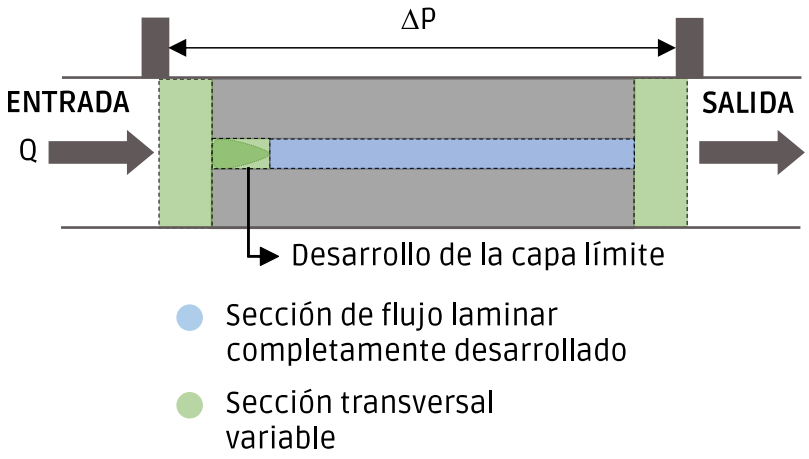


Figura 2. >> Secciones principales de un LFE.

2. ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR LFES

2.1 GENERALIDADES

Los elementos de flujo laminar (Laminar Flow Elements - LFEs), son medidores empleados para la medición de flujo en conductos cerrados bajo un régimen laminar completamente desarrollado a velocidades subsónicas. Estos medidores son ideales para bajos y micro caudales, empleando siempre gases limpios, secos y no corrosivos; no generan ruido, poseen una baja caída de presión y tienen una alta repetibilidad y control de exactitud de la medición. El diseño más común que se emplea para los LFEs son los tubos capilares. Sin embargo, también se pueden encontrar en forma de matriz, anular, rectangular o helicoidal, como se puede observar en la Figura 1 [1].

El diseño de los LFEs se caracteriza por la alta estabilidad de la medición en el tiempo al no poseer partes móviles, y como ya se mencionó, permiten una alta repetibilidad de medición siempre y cuando estén acompañados de la instrumentación adecuada, lo que los hace idóneos para operar como patrones de transferencia o patrones secundarios de laboratorio. Adicionalmente, el diseño permite a los LFEs tener gran versatilidad de montaje en cuanto orientación y conexiones, además de posibilitar un amplio rango de condiciones de operación, tanto de presión como de temperatura.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL PRINCIPIO FÍSICO DE LOS LFES

2.2.1 ENFOQUE: CAÍDAS DE PRESIÓN INVOLUCRADAS

El principio de operación de los LFEs se basa en la caída de presión ΔP que se genera a través de un conducto cerrado, el cual se compone de dos secciones principales, como se puede observar en la Figura 2.

- **Sección de flujo laminar completamente desarrollado**

En la sección central el flujo se encuentra completamente desarrollado en régimen laminar, donde la caída de presión $\Delta P_{laminar}$ que se genera a través de la tubería, es proporcional a la viscosidad dinámica del fluido μ y al caudal volumétrico del mismo (definido como el producto entre la velocidad y el área transversal). Tal como

lo expone la ley de Hagen-Poiseuille[1]

$$\Delta P_{laminar} = C \cdot \mu \cdot Q \qquad (1)$$

La constante de proporcionalidad C, está dada por la calibración individual de cada LFE y representa la caracterización propia de cada uno, debido a que a diferencia de los medidores que operan bajo el mismo principio (boquillas, placas de orificio, Venturi, tubos Pitot, etc.), los LFEs no poseen diseños estandarizados o un desempeño establecido debido a la complejidad y versatilidad de su geometría interna. Una vez los LFEs son calibrados, los usuarios podrán predecir con alta precisión el comportamiento del medidor sobre las condiciones y rango de operación, incluso con diferentes gases.

Otro de los aspectos a tener en cuenta, como se puede observar en Ecuación 1, es la relación lineal entre la caída de presión y el caudal volumétrico, siendo esta otra de las diferencias entre los medidores que operan bajo el mismo principio, en los cuales la relación es cuadrática.

Es importante destacar la relevancia de la viscosidad dinámica del fluido en el cálculo del caudal volumétrico a través de los LFEs, la cual en la práctica es calculada a partir de la medición de presión y temperatura y relaciones experimentales establecidas. A diferencia de otros medidores de flujo, dependientes del número de Reynolds y, por lo tanto, de la viscosidad, los LFEs podrían catalogarse como los medidores más sensibles a la viscosidad del fluido, debido a que el mínimo cambio de ésta, repercute en la misma proporción sobre el caudal, pero con signo opuesto. Este efecto se puede evidenciar por medio de una analogía con la ley de Ohm [1], la cual además representa de manera sencilla el desempeño real de los LFEs, como se muestra a continuación.

$$I = \frac{V}{R} \cdot 1 \quad \leftrightarrow \quad Q = \frac{\Delta P_{laminar}}{\mu} \cdot C \qquad (2)$$

La corriente eléctrica I representaría el caudal volumétrico, la diferencia de potencial V la presión diferencial $\Delta P_{laminar}$, y la resistencia eléctrica R la viscosidad dinámica μ. Para el caso de la Ley de Ohm, la representación de la constante de proporcionalidad C sería igual a la unidad. Debido a la analogía presentada, los LFEs han sido también reconocidos como "medidores de resistencia lineal".

- **Sección transversal variable**

Esta sección abarca la sumatoria de las caídas de presión $\Delta P_{área\ variable}$ que se presentan debido a los cambios drásticos de las secciones transversales de los LFEs [2], las cuales se relacionan por medio de una constante de proporcionalidad K. Las diferentes caídas de presión son proporcionales al producto de la densidad y el cuadrado de la velocidad del flujo, y por lo tanto, proporcionales al cuadrado del caudal volumétrico Q, como se representa en la Ecuación 3.

$$\Delta P_{área\ variable} = \sum K \cdot \rho \cdot Q^2 \qquad (3)$$

La presión diferencial $\Delta P_{(área\ variable)}$ es la sumatoria tanto de las caídas de presión a la entrada y salida de la sección central, como la que se origina a partir del desarrollo de la capa límite.

[1]Ley física encargada de estudiar el comportamiento de los fluidos newtonianos incompresibles bajo un régimen laminar completamente desarrollado, a través de conductos cerrados con sección transversal constante. Cabe resaltar, que esta ley aplica para fluidos compresibles bajo condiciones constantes de densidad y viscosidad

La densidad del gas, es el valor promedio que se emplea para todos los cambios de sección, lo cual es posible debido a que la caída de presión total es muy baja en comparación con la presión estática del gas, permitiendo tratar al flujo como incompresible.

La relación entre el caudal volumétrico Q y la constante de proporcionalidad K, permanece constante durante toda la sección, lo cual permite combinar las caídas de presión debido a cambios de área transversal e independientes de las fuerzas viscosas.

- **Combinación**

A partir de la combinación de la Ecuación 2 y Ecuación 3, se obtiene el modelo general de la Ecuación 4, el cual busca caracterizar el principio físico de los LFEs por medio de la relación entre la presión diferencial total ΔP a través de un LFE, el caudal volumétrico Q, las propiedades del fluido μ y ρ, la constante de proporcionalidad de calibración C, y la relación de áreas trasversales K.

$$\Delta P = C \cdot \mu \cdot Q + K \cdot \rho \cdot Q^2 \qquad \textbf{(4)}$$

Dividiendo la Ecuación 4 entre el producto de la viscosidad dinámica y el caudal volumétrico (μ·Q), se obtiene la Ecuación 5, la cual es de gran utilidad para el estudio de los LFEs desde la mecánica de fluidos, debido a la proporcionalidad del término (ρ·Q)/μ con el número de Reynolds [3].

Donde K y C son la pendiente e intercepto con el eje vertical, respectivamente, de un comportamiento lineal.

Una de las limitantes que presenta la Ecuación 5, es la necesidad de aplicar iteraciones para el cálculo del caudal volumétrico, dado que éste no se encuentra de manera independiente, lo que no permite calcularlo netamente a partir de las magnitudes medibles, como lo son la presión diferencial a través del LFE y la presión absoluta y temperatura que determinan la densidad y viscosidad dinámica del fluido.

Para solucionar el inconveniente presentado, los medidores que operan bajo el principio de presión diferencial, expresan el desempeño en función de un coeficiente de descarga (caudal volumétrico medido sobre caudal volumétrico teórico) y el número de Reynolds. Sin embargo, para el caso de los LFEs, persiste el inconveniente debido a que el cálculo de caudal volumétrico medido, sigue dependiendo de él mismo aplicando la Ecuación 5.

A partir del análisis del comportamiento de los LFEs y los modelos matemáticos desarrollados

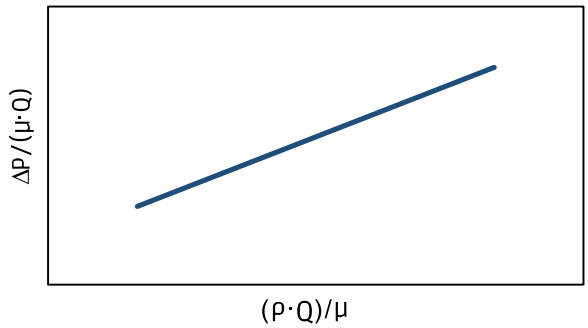
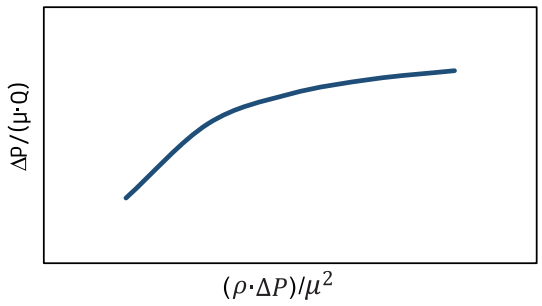


Figura 3. >> Desempeño teórico de un LFE.

$$\frac{\Delta P}{\mu \cdot Q} = C + K \cdot \frac{\rho \cdot Q}{\mu} \qquad \textbf{(5)}$$

Figura 4. >> Desempeño práctico de un LFE.



$$\frac{\Delta P}{\mu \cdot Q} = C + K \cdot \frac{\rho \cdot \Delta P}{\mu^2} \quad (6)$$

anteriormente, se puede observar que el caudal volumétrico es proporcional a la presión diferencial sobre la viscosidad dinámica del fluido, por lo tanto, al reemplazar esta relación en la Ecuación 6, se obtiene la Figura 4.

La parábola obtenida a partir de la Ecuación 6, refleja el desempeño de los LFEs con mayor acierto, como lo ha evidenciado el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) [4].

2.2.2 ENFOQUE: ANÁLISIS DIMENSIONAL

La caracterización del fenómeno físico de los LFEs, también se puede abordar desde un análisis dimensional o Teorema Pi de Buckingham, el cual permite agrupar las diferentes variables involucradas en grupos adimensionales más pequeños, reduciendo la complejidad del modelo matemático.

Este estudio fue llevado a cabo por Baker y Shafer [5], quienes identificaron siete variables que pudieran ser significativas en el principio físico de los LFEs: caudal Q, diferencial de presión ΔP, viscosidad dinámica μ, densidad ρ, presión absoluta P, longitud característica D y relación de calores específicos K. Posteriormente, determinaron tres unidades fundamentales requeridas para expresar las variables identificadas (masa, longitud y tiempo), y de esta forma aplicar el Teorema Pi de Buckingham, el cual establece que el número de grupos adimensionales independientes es igual al número de variables identificadas menos las unidades fundamentales requeridas para expresarlas. Por lo tanto, desarrollaron cuatro grupos adimensionales, relacionados en la Ecuación 7.

$$\frac{Q \cdot \mu}{\Delta P \cdot D^3} = \alpha \left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot D^2}{\mu^2}, \frac{\Delta P}{P}, K \right) \quad (7)$$

Agrupando los efectos de compresibilidad en un solo grupo adimensional, obtuvieron:

$$\frac{Q \cdot \mu}{\Delta P \cdot D^3} = \beta \left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot D^2}{\mu^2}, \frac{\Delta P}{P \cdot K} \right) \quad (8)$$

Debido a que todo LFE posee una longitud característica D particular, esta variable no puede ser extrapolada a otros medidores, a diferencia de otras tecnologías que operan bajo el mismo principio, y, por lo tanto, debe extraerse del análisis dimensional, obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{Q \cdot \mu}{\Delta P} = \gamma \left(\frac{\rho \cdot \Delta P}{\mu^2}, \frac{\Delta P}{P \cdot K} \right) \quad (9)$$

Teniendo en cuenta que la caída total de presión a través de los LFEs es muy baja en comparación con la presión estática del gas, es posi-

ble considerar el flujo como incompresible, así como lo demostró el estudio llevado a cabo por Todd [6], en el que se concluyó que aplicar un modelo basado en el número de Reynolds para los LFEs, es preciso y suficiente, independientemente de su diseño, condiciones de operación, gas empleado o presentación de resultados de calibración. Por consiguiente, la Ecuación 10 describe el desempeño típico de los LFEs con gran acierto.

$$\frac{Q \cdot \mu}{\Delta P} = f\left(\frac{\rho \cdot \Delta P}{\mu^2}\right) \qquad \textbf{(10)}$$

Como se puede observar, a partir del análisis dimensional se obtuvo la misma agrupación de variables que la representada en la Ecuación 6, lo cual denota coherencia entre ambos enfoques.

2.2.3 Modelos matemáticos de mayor exactitud

Como ya se mencionó, la Ecuación 6 describe con gran acierto el desempeño típico de los LFEs, además de ser fácilmente aplicable, pues no requiere de complejos conocimientos en el campo de la mecánica de fluidos. Sin embargo, buscando mayor exactitud para ciertas aplicaciones, diferentes fabricantes han desarrollado modelos polinomiales empíricos, asociados a las caídas de presión a través de los LFEs y soportados por el análisis dimensional descrito anteriormente.

Aplicando el modelo polinomial denominado “Uniflow” [7], se caracteriza el desempeño del medidor por medio de la siguiente expresión empírica.

$$\frac{\rho \cdot Q}{\mu} = \left(C_n \cdot \left(A \cdot \frac{\rho \cdot \Delta P}{\mu^2}\right)^n + \ldots + C_1 \cdot \left(A \cdot \frac{\rho \cdot \Delta P}{\mu^2}\right)\right) \cdot \frac{1}{B} \qquad \textbf{(11)}$$

Donde:

- Q: Caudal volumétrico a través del LFE.
- μ: Viscosidad dinámica del fluido.
- ρ: Densidad del fluido.
- ΔP: Diferencial de presión en LFE.
- C_n: Coeficientes polinomiales de calibración.
- A,B: Coeficientes de normalización polinomial de segundo orden.

La ecuación 11, centra su interés en expresar los resultados de calibración en función de una transformación del número de Reynolds y del flujo másico [6], ya que este último es independiente de la presión de operación y facilita la interpretación de resultados cuando el caudal volumétrico es reportado a diferentes condiciones termodinámicas.

3 ELEMENTOS SECUNDARIOS Y TERCIARIOS DE MEDICIÓN

A continuación, se presentan las magnitudes requeridas para el cálculo del caudal volumétrico a través de los LFEs y las magnitudes de monitoreo que deben ser tenidas en cuenta durante la operación según diferentes fabricantes y métodos aplicados de calibración. Cada una de estas magnitudes puede ser registrada manualmente, o preferiblemente por medio de un sistema de adquisición de datos, el cual se encargue mediante tarjetas electrónicas del tratamiento de las señales eléctricas emitidas por los sensores, buscando garantizar homogeneidad térmica y caídas de presión identificadas a lo largo del recorrido del fluido.

Cabe destacar que tanto la presión absoluta como la temperatura del fluido, son magnitudes que deben medirse en el patrón y medidor bajo prueba en procesos de calibración, de tal manera que puedan compararse los respectivos flujos a través de cada uno, por medio de la relación de las condiciones termodinámicas medidas.

3.1 Medición de presión diferencial

La incertidumbre de medición asociada al caudal volumétrico en un LFE depende en gran medida de la instrumentación secundaria, especialmente la empleada para la presión diferencial, ya que como se evidenció en el numeral 2.2 ésta es la magnitud más relevante en un LFE debido a la relación directa con el caudal volumétrico.

Para la adecuada selección del instrumento de presión diferencial, es importante tener en cuenta que la incertidumbre de éste debe ser inferior a la incertidumbre asociada a la calibración del LFE, de tal manera que la incertidumbre combinada, no se vaya a ver afectada significativamente por un elemento secundario de medición.

Por otro lado, la rangeabilidad de los LFEs, depende no solo de la geometría interna de los mismos, sino también de las características metrológicas del instrumento de presión diferencial. Los LFEs pueden alcanzar relaciones de caudal de operación 200:1 (dentro del régimen laminar), o incluso mayores; sin embargo, la capacidad que el instrumento de presión diferencial tenga para medir las bajas caídas de presión que se presentan en todo el intervalo de operación, determinará el intervalo óptimo del LFE. Por tal razón, se podría llegar a requerir dos o incluso más instrumentos de presión diferencial para un mismo LFE.

3.2 Medición de presión absoluta

La medición de presión absoluta se emplea para determinar la densidad del fluido de calibración, la cual como ya se explicó en el numeral 2.2 se requiere para determinar la relación entre las caídas de presión producto de los cambios en áreas transversales y el caudal volumétrico a través de un LFE.

Algunos LFEs incluyen dentro de su estructura el respectivo sensor de presión absoluta. Sin embargo, para obtener mejores características metrológicas, diferentes fabricantes dejan a disposición del usuario los instrumentos respectivos para la medición de esta magnitud, especificando el puerto donde debe ser leída según la calibración del LFE.

3.3 Medición de temperatura

La medición de temperatura, al igual que la presión absoluta, se emplea para determinar la densidad del fluido de calibración, sin embargo, la mayor influencia de ésta se evidencia en el cálculo de la viscosidad dinámica, ya que como se describió en el numeral 2.2, las fuerzas viscosas que interactúan bajo el régimen laminar son las más relevantes en la relación entre la presión diferencial y el caudal volumétrico a través de un LFE.

A diferencia de la presión absoluta, la temperatura puede ser tomada tanto a la entrada como a la salida del LFE ya que su variación es despreciable. Sin embargo, se debe tener en cuenta la ubicación del sensor de temperatura para prevenir alteraciones en el perfil de flujo o mediciones que no correspondan netamente al fluido (cuando éste no se encuentra inmerso en la estructura del LFE).

3.4 Medición de condiciones ambientales

Si bien la medición de presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa, no se requieren para determinar el caudal volumétrico a través de un LFE, son necesarias para la verificar las condiciones ambientales de operación, establecidas por el método empleado y por el fabricante para un óptimo desempeño.

3.5 Elemento terciario de medición

Como elemento terciario de medición se define el sistema de adquisición de datos, encargado de ejecutar las labores de registro y monitoreo de las variables involucradas en el método y modelos matemáticos de calibración, disminuyendo la incertidumbre asociada a errores humanos en los procesos de registro y optimizando la operación de los LFEs.

Los instrumentos y sensores envían las señales eléctricas hacia tarjetas de adquisición de datos de acuerdo con su naturaleza digital o analógica, y éstos a su vez la transmiten al procesador del sistema el cual convierte estas señales en información digital que es transferida a un controlador para ser corregida y presentada al usuario por medio de un PC o display.

Este sistema de adquisición de datos puede ir inmerso en la carcasa de los LFEs o puede ser externo, lo cual dependerá de los diferentes fabricantes y requerimientos metrológicos.

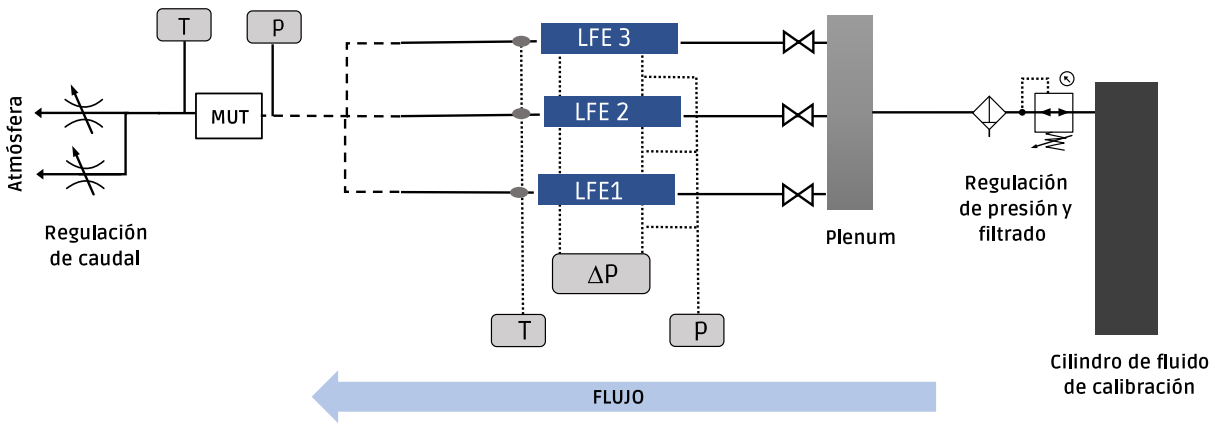
4. BANCO DE CALIBRACIÓN DE CAUDAL DE GAS EMPLEANDO ELEMENTOS DE FLUJO LAMINAR (LFEs)

4.1 Operación

A continuación, se describirá el proceso general de operación del banco de flujo laminar desarrollado en la Corporación CDT de GAS, representado en la Figura 5.

El sistema inicia con el suministro del fluido de calibración por medio de un cilindro de gas comprimido, el cual es estrangulado y acondicionado a través de tres etapas de regulación y un mecanismo de filtrado de micropartículas. Posteriormente, el aire es dirigido hacia un plenum, donde el fluido se estabiliza térmicamente y permite que la presión hidrostática se distribuya de igual manera sobre cada una de las tres líneas del banco, las cuales son aisladas por medio de válvulas de paso según el caudal volumétrico de prueba. El flujo continúa a través del LFE seleccionado, para luego ingresar al medidor bajo prueba (MUT) y finalmente dirigir-

Figura 5. >> Esquema de operación de banco de calibración de caudal de gas empleando LFEs.



se hacia las válvulas de regulación de caudal las cuales conducen a la atmósfera.

La medición de presión absoluta se realiza a la entrada del LFE como lo recomienda el fabricante, mientras la temperatura es tomada a la salida de éste para evitar alteraciones en el perfil de flujo. Respecto a la medición de presión absoluta y temperatura a través MUT, se realiza de acuerdo con las especificaciones, tecnología o método de calibración del medidor.

Respecto a la presión diferencial, se instalan dos instrumentos, uno empleado para los mayores caudales de cada LFE y el otro para los menores (caídas de presión menores), de tal manera que la incertidumbre de medición no se vaya a ver afectada significativamente por esta magnitud, como se verá en el numeral 4.3.

4.2 Componentes principales

Figura 6. >> Componentes principales de banco de calibración de caudal de gas empleando LFEs

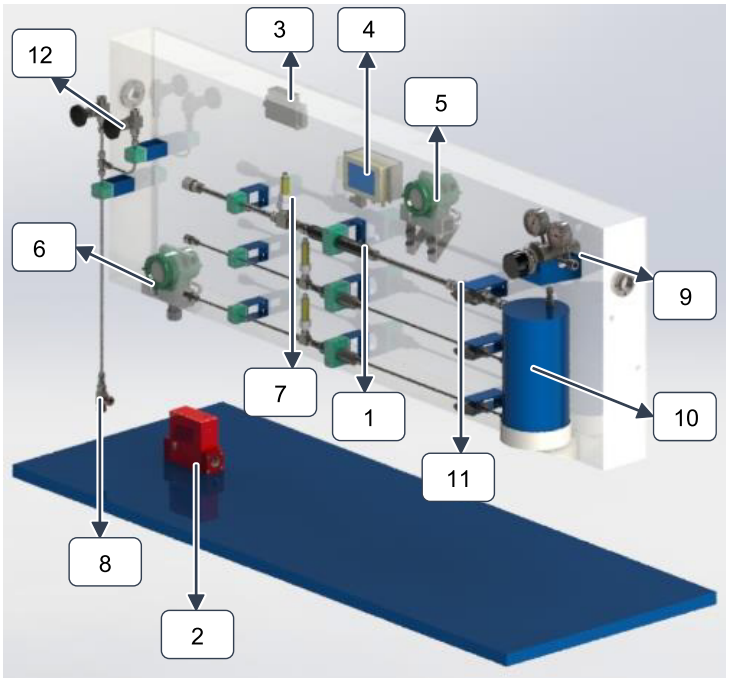


Tabla 1. >> Componentes principales de banco de calibración empleando LFEs.

N°	Componente	N°	Componente
1	Elementos de flujo laminar (LFEs)	1	RTDs para LFEs
2	Medidor bajo prueba (MUT)	2	RTD para MUT
3	Transmisor de presión diferencial alta para LFEs	3	Sistema de regulación y filtrado
4	Transmisor de presión diferencial baja para LFEs	4	Plenum
5	Transmisor de presión absoluta para LFEs	5	Válvulas de paso entrada LFEs
6	Transmisor de presión absoluta para MUT	6	Válvulas de regulación de caudal

Tabla 2. >> Especificaciones de banco de calibración empleando LFEs.

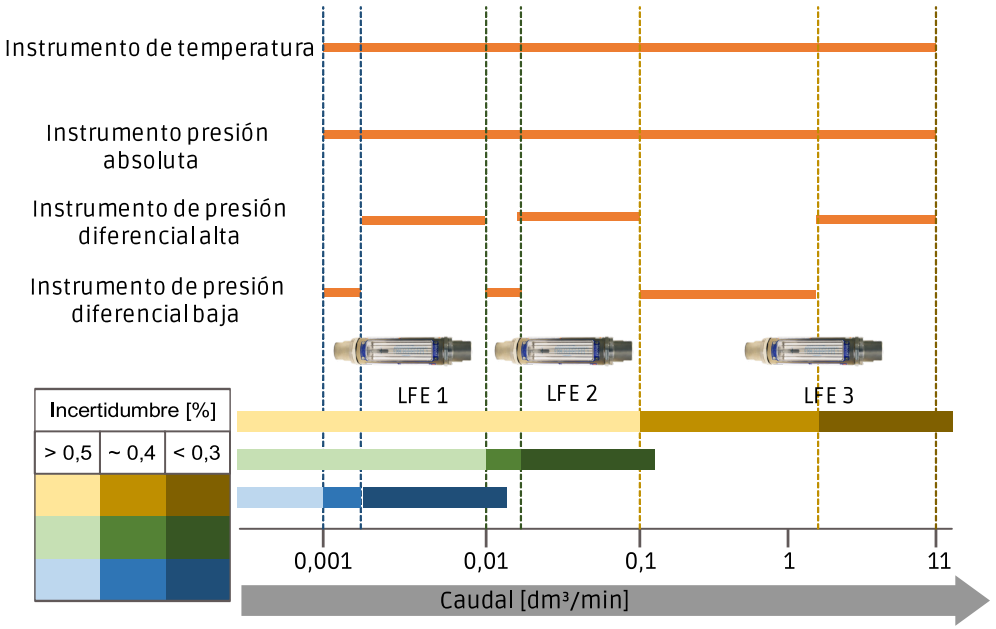
Medidores objetivo	Caudalímetros
Medidores patrón	El banco usa tres patrones tipo elemento de flujo laminar: • LFE 1: 0,001 – 0,01 [dm³/min] • LFE 2: 0,01 – 0,1 [dm³/min] • LFE 3: 0,1 – 11 [dm³/min]
Temperatura de operación	20 ± 2 [°C]
Presión absoluta de operación	De 905 ± 5 [hPa] a 2000 ± 5 [hPa]
Humedad ambiente	50 ± 20 [%HR]
Incertidumbre relativa al error de medición característica	U ≤ 0,4 [%] (k=2)

4.3 Especificaciones de operación y alcance

La incertidumbre de calibración dependerá del instrumento de presión diferencial y el LFE a emplear para cada caudal volumétrico. Para lo cual el sistema de control y adquisición de datos se encargará de seleccionar la configuración óptima como se puede observar en la Figura 7.

Por otro lado, a lo largo del intervalo de operación de cada uno de los LFEs, la incertidumbre de calibración varía junto con la contribución de cada magnitud de entrada, como se puede observar en la Figura 7.

Figura 7. >> Instrumentación empleada para cada intervalo de operación.



* La incertidumbre es relativa al error de medición, expandida con un factor de cobertura de k=2

** Los colores hacen referencia a la incertidumbre asociada a cada LFE para un respectivo intervalo de caudal volumétrico.

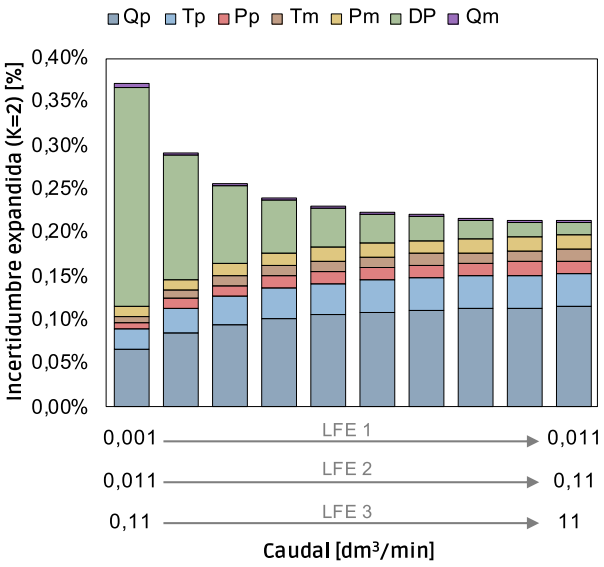


Figura 8. >> *Contribución en la incertidumbre de calibración de las magnitudes implicadas.*

Tabla 3. >> *Especificaciones de banco de calibración empleando LFEs.*

Ventajas	Desventajas / Consideraciones
Alta estabilidad metrológica en el tiempo debido a su geometría interna (libre de partes móviles), lo cual permite una excelente repetibilidad de medición empleando la adecuada instrumentación.	Requiere de instrumentación secundaria de altas cualidades metrológicas, especialmente para la medición de la presión diferencial.
Son idóneos para operar como patrones de transferencia y patrones secundarios, debido a su bajo peso, tamaño, geometría compacta y altas cualidades metrológicas, especialmente en bajos y micro caudales.	Debe emplearse como fluido de operación o calibración, gases limpios y preferiblemente secos, acompañados de un sistema óptimo de filtrado, el cual permita evitar obstrucciones o alteración en la medición del LFE
La calibración basada en el número de Reynolds, permite que los LFEs operen con diferentes gases sin alterar la exactitud de la medición.	Para caracterizar el desempeño de cada LFE, se requiere de una calibración individual.
El principio de operación ha sido ampliamente estudiado, lo que ha permitido que gran cantidad de industrias empleen LFEs en sus procesos y, por lo tanto, se desarrollen continuamente mejoras.	Requiere de secciones rectas aguas arriba y aguas abajo debido a que el perfil de velocidad a través del LFE debe ser completamente desarrollado en régimen laminar, para lo cual podría llegar a necesitar rectificadores de flujo.
Relación lineal entre caudal y la presión diferencial.	
Bajas caídas de presión.	

Donde el subíndice p representa al patrón (LFE) y el subíndice m al medidor. Cabe destacar que existen otras fuentes de incertidumbres asociadas a la calibración que no fueron representadas en la Figura 8 por su baja contribución, pero que son tenidas en cuenta en el presupuesto general de incertidumbre.

Esta variación, se debe principalmente a las cualidades metrológicas del instrumento de presión diferencial empleado, ya que, para los menores caudales de operación de cada LFE, y, por lo tanto, para las menores caídas de presión, la incertidumbre de medición del instrumento incrementa.

5 DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan las ventajas y desventajas de los LFEs, además de algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta para su cuidado y óptima operación.

6 CONCLUSIONES

El principio de operación de los LFEs puede ser abordado desde el enfoque asociado a las caídas de presión a través de un LFE o por medio de un análisis dimensional aplicando el teorema Pi de Buckingham. A partir de cada uno de ellos se obtiene la relación entre el caudal volumétrico, la presión diferencial, la densidad, viscosidad dinámica y las constantes de proporcionalidad derivadas de la calibración individual del LFE.

Los LFEs son instrumentos idóneos para operar como patrones de transferencia o secundarios de medición de flujo, debido a que su principio de operación y diseño interno, permiten altas cualidades metrológicas (especialmente en bajos y micro caudales), costo reducido de aseguramiento metrológico y posibilidad de ser empleado con diferentes gases. Por lo cual, a partir de estas características, se desarrolló un banco para la prestación de servicios acreditados de calibración desde 0,001 dm^3/min a 11 dm^3/min bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025, reconocida por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

El desarrollo y puesta en marcha del banco de calibración empleando LFEs, consideró la importancia de la medición de la presión diferencial para determinar el caudal volumétrico, para lo cual se emplearon dos instrumentos que pudieran garantizar la incertidumbre requerida en todo el intervalo deseado para cada patrón.

Se seleccionó la instrumentación requerida para la medición de presión absoluta y temperatura, teniendo en cuenta la sensibilidad del caudal volumétrico a la densidad y viscosidad dinámica del fluido a través de los LFEs empleados, y garantizando que las características metrológicas de la instrumentación secundaria no tuvieran influencia significativa en la incertidumbre combinada asociada al caudal volumétrico. Así mismo, se consideraron las condiciones termodinámicas de operación requeridas para obtener el mejor desempeño de los LFEs.

7 REFERENCIAS

[1] Spitzer DW. 2001. Flow Measurement – Practical Guides for Measurement and Control (2 ed). En: Laminar Flow Elements: 205–238.

[2] Roberson JA. 1975. Engineering Fluid Mechanics.

[3] Steel DI, Orbach LB. 1963. Theory and Use of the Vol-O-Flo*Meter.

[4] Wright JD. 2004. Gas Property Equations for the NIST Fluid Flow Group Gas Flow

[5] Measurement Calibration Services. NIST.

[6] Baker DW, Shafer MR. 1967. Preliminary notes on Laminar Flowmeters Flowing Gases. International document of the National Bureau of Standards.

[7] Todd DA. 1981. A 'Universal Calibration Curve' for Laminar Flowmeters, Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, volume 2: 695.

[8] Calibration Laboratory of TetraTec Instruments GmbH. 2019. Calibration certificate: D-K 17589-01-00.

[9] Wright JD, Cobu T, Berg RF, Moldover M. 2012. Calibration of laminar flow meters for process gases Flow Measurement and Instrumentation 25: 8-14.